INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | PROLONGAR LA JUVENTUD | AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS | AGRICULTURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

N.º 426 MARZO 2012

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Marzo 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ARQUEOLOGÍA
Urbanismo en la costa de África

SOSTENIBILIDAD
Agricultura y eficiencia energética

COSMOLOGÍA
Formación de agujeros negros supermasivos

PROLONGAR LA JUVENTUD

Nuevos hallazgos sobre los mecanismos celulares que controlan el envejecimiento



6,00 EUROS

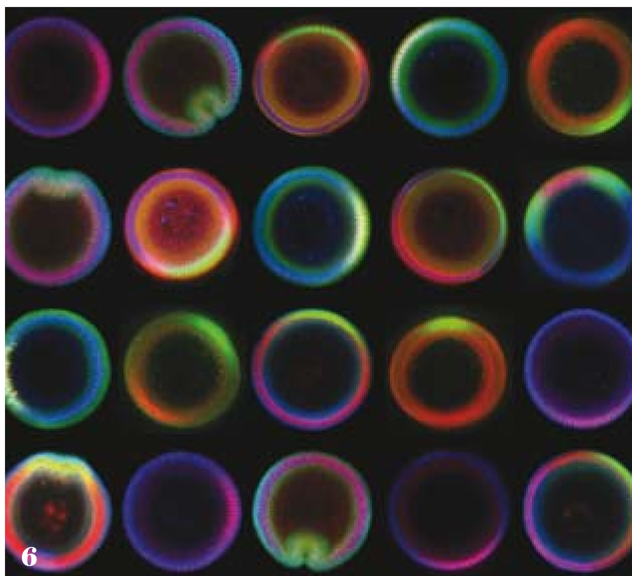


INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

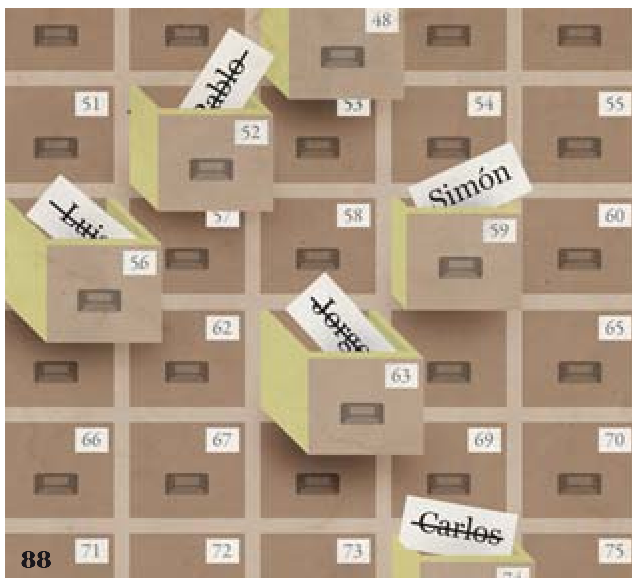
Marzo 2012, Número 426

CHRISTOPHER GRIFFITH

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



¿Qué pasaría si pudiera retardarse el envejecimiento? Además de ganar años de vida, se podrían aplazar algunas enfermedades asociadas a la edad, como el cáncer y la diabetes, y mantendríamos la vitalidad más tiempo. Estudios recientes han hallado un regulador molecular del envejecimiento, lo que ha hecho albergar esperanzas de que algún día ciertos fármacos nos ayuden a alcanzar esos objetivos. Fotografía de Evan Kafka.

redaccion@investigacionyciencia.es



Octubre 2011

SUGERENCIA ESTADÍSTICA

Como biólogo estadístico, comparto las críticas que Charles Seife vierte en «La empatía de los salmones... o el significado de las estadísticas» [Investigación y Ciencia, octubre de 2011] sobre el mal uso del valor *p* para evaluar la significancia estadística de los datos. Los expertos ya han advertido en el pasado sobre este método e incluso han llegado a recomendar su prohibición. Yo suavizaría tales críticas, pues existe toda una serie de ajustes que pueden hacerse al valor *p* para dar cuenta de los efectos espurios que provoca la realización repetida de una misma prueba. Dichos ajustes se emplean a menudo, aunque quizá menos de lo debido.

Otra cuestión de relevancia en este asunto, sin embargo, es la tendencia de numerosas revistas a publicar aquellos artículos que refieren resultados estadísticamente significativos, en detrimento de los que no lo son. En el pasado he defendido que, para evitar los problemas relacionados con la evaluación de la significancia de la hipótesis nula, los editores deberían regirse por criterios de publicación «ciegos» a dichos resultados y, además, dar a conocer que obran de esa manera. Un artículo debería ser aceptado o no en función de la importancia atribuida a la investigación realizada (algo que suele defenderse al comienzo del manuscrito) y la solidez de la metodología empleada, incluido el de análisis de los datos.

De esta manera, si se realizasen 20 estudios para evaluar la eficacia de un fármaco que en realidad es inactivo y, por pura casualidad, uno de ellos arrojara un valor *p* inferior a 0,05, los autores de las otras 19 investigaciones no se abstendrían de redactar y enviar sus resultados a una revista; algo que sí sucede cuando existe el temor a que los resultados sean rechazados por no ser significativos. La publicación de este tipo de estudios despertaría un sano escepticismo en la comunidad científica ante un solo hallazgo positivo en medio de un aluvión de informes que indican lo contrario.

Joseph J. Locascio
Profesor de neurología
Facultad de medicina de Harvard

OSCURIDAD Y LUZ

En «El lado oscuro de la Vía Láctea» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2011], Leo Blitz afirma que la naturaleza de la materia oscura permanece «tan desconocida como el primer día», que la hipótesis más conservadora supone que «se compone de alguna partícula exótica que jamás ha sido detectada en los aceleradores» y que «solo se manifiesta a través de su influencia gravitatoria».

Quienes conozcan bien la historia de la física no podrán evitar acordarse del éter, la «sustancia» igualmente misteriosa e indetectable que fue postulada en el siglo xix y cuya existencia fue aceptada para explicar la propagación de la luz, entonces considerada exclusivamente como onda, a través del espacio. Después, sin embargo, el descubrimiento de la naturaleza dual de la luz hizo del éter algo innecesario. No debería extrañarnos, pues, que en una teoría futura y más completa sobre la naturaleza de la gravedad, el espacio y el tiempo, la materia oscura quedase reducida a nada más que un constructo histórico.

Harvey Smith
Carrollton, Texas

Responde Blitz: *Es posible que una modificación adecuada de la teoría de la relatividad general de Einstein logre explicar los diversos fenómenos que hoy atribuimos a la materia oscura. Sin embargo, y pese al ejemplo del éter, la historia de la astronomía se encuentra repleta de objetos «oscuros» que, más tarde, fueron identificados por otros medios. Entre ellos, Neptuno y la compañera de Sirio, cuyos primeros indicios, al igual que la materia oscura, se debieron exclusivamente a sus efectos gravitatorios sobre los cuerpos circundantes.*

ÉTICA ENTOMOLÓGICA

Mi respuesta emocional ante un artículo como «El gen destructor» [Investigación y Ciencia, enero de 2012], en el que Bijal P. Trivedi describe el empleo de la ingeniería genética para acabar con el mosquito *Aedes aegypti*, fue de inquietud. Desde nuestro punto de vista, *A. aegypti* no es más que un vector de enfermedades, pero en realidad desconocemos su importancia ecológica.

También resulta perturbador el hecho de que bastase con obtener el permiso en una asamblea popular formada por individuos legos en la materia, cuando solo los expertos conocen el verdadero significado de la manipulación genética del artrópodo y su impacto ecológico.

Es arrogante, temerario y peligroso realizar juicios de valor sobre la importancia de una especie.

Charles F. Lovell, Jr.
Exmiembro del Comité Nacional
de Asesoramiento sobre Vacunas
EE.UU.



Diciembre 2011

Enero 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

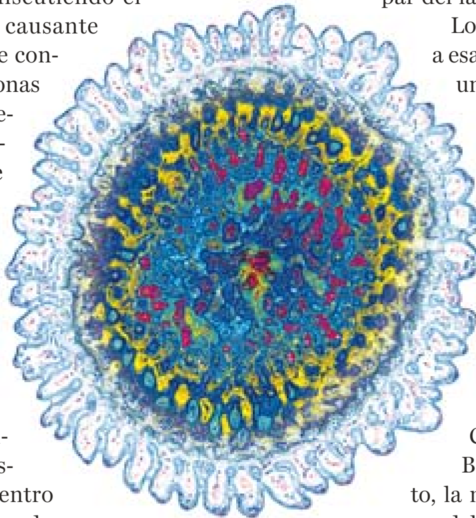
Apuntes

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Una enfermedad artificial

No suele suceder que una investigación provoque un pánico desenfrenado incluso antes de ser publicada. Sin embargo, es la época de la gripe y las noticias sobre ella suelen causar cierto revuelo en estos meses del año.

Los epidemiólogos llevan tiempo discutiendo el potencial pandémico del virus H5N1, causante de la gripe aviar. Por un lado, el virus se contagia con tan poca frecuencia entre personas que por el momento no supone una amenaza seria: que se sepa, ha causado menos de 600 casos de gripe humana desde que apareció en 1997. Pero por el otro, cuando lo hace, puede resultar letal: casi el sesenta por ciento de las personas infectadas murieron. Durante años, las investigaciones han sugerido que cualquier mutación que aumentase la capacidad de contagio del virus entre humanos reduciría al mismo tiempo su letalidad. Sin embargo, Yoshihiro Kawaoka, de la Universidad de Wisconsin-Madison, y Ron Fouchier, del Centro Médico Erasmus en los Países Bajos, han demostrado lo contrario en una serie de estudios cuyos resultados se entregaron para su publicación a finales del año pasado.


Virus H5N1

Trabajando de forma separada, ambos encontraron una combinación de mutaciones (cinco, en el caso de Fouchier) que posibilitan el contagio del virus H5N1 a través del aire, aumentando así la facilidad de propagación entre humanos, sin perder por ello su carácter letal.

Los intentos de publicar estos hallazgos han tropezado con una fuerte oposición. Los detractores afirman que publicar la metodología o la secuencia genética equivaldría a entregar a los posibles bioterroristas una receta fácil de poner en práctica. También les preocupa que estas cepas artificiales puedan escapar del laboratorio.

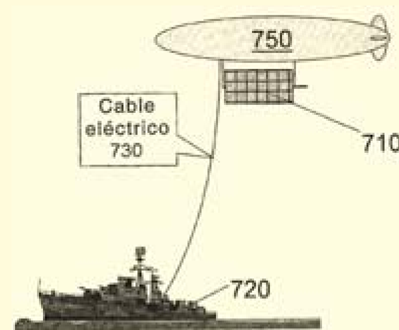
Los partidarios de la publicación responden a esas objeciones señalando que la amenaza de una pandemia mundial, en caso de que esta cepa mutada surgiese en la naturaleza, sería mucho mayor que la amenaza bioterrorista. Entender qué combinación de mutaciones transformaría el virus H5N1 en una pandemia para la humanidad ayudaría a los epidemiólogos a preparar contramedidas; por ejemplo, podrían poner a prueba las vacunas disponibles con la nueva cepa.

A mediados de diciembre, ambos estudios estaban siendo revisados por el Consejo Nacional Científico Asesor para la Bioseguridad (NSABB) de EE.UU. Entre tanto, la mayoría de los expertos están de acuerdo en que debe hallarse una mejor forma de proceder.

«Los físicos llevan setenta años realizando investigaciones secretas», señala Michael T. Osterholm, experto en enfermedades infecciosas de la Universidad de Minnesota y miembro del NSABB. «Tenemos que hallar el modo de hacer lo mismo en las ciencias de la salud, sin poner en peligro nuestra seguridad». *—Jeneen Interlandi*

PATENTES

Estación eléctrica aérea: Como buen residente de Seattle, Brian J. Tillotson, ingeniero de Boeing, ha pasado largo tiempo observando las nubes y preguntándose cómo los habitantes de una zona con tan poco sol podrían aprovechar la energía solar. Hace más de tres años halló la respuesta: construir una central eléctrica por encima de las nubes.



La idea, descrita en la patente número 8.006.933 B2 de la oficina estadounidense, tiene aplicaciones hasta en las zonas más soleadas. Entre el veinte y el treinta por ciento de la energía solar se disipa en las capas bajas de la atmósfera, incluso cuando no hay nubes ni neblina. Esa pérdida supone un desafío para Spectrolab, una filial de Boeing que fabrica células solares con reflectores que amplifican entre 400 y 800 veces la concentración de luz. Las células de Spectrolab suelen utilizarse para suministrar energía a los satélites que orbitan muy por encima de la atmósfera, donde ese apantallamiento se torna irrelevante. En 2008, sin embargo, Tillotson comenzó a investigar si habría alguna manera de adaptarlas a las tropas estadounidenses en Afganistán, donde los problemas de seguridad en el suministro habían llegado a elevar el precio del gasóleo hasta casi los 200 dólares por litro.

Tillotson se percató de que una central eléctrica flotante podría resolver el problema y, además, generar energía para Seattle. Su idea consiste en fijar células solares a un dirigible, del cual colgaría un cable de transmisión ligero de varios kilómetros de longitud. El Ejército de EE.UU. ya está experimentando con dirigibles de reconocimiento alimentados desde tierra a través de cables. El dispositivo de Boeing sería similar, con la diferencia de que la energía bajaría en lugar de subir.

La empresa aún no ha construido un prototipo. Sus ingenieros se encuentran investigando mejoras que abaraten la central, pues, por ahora, los dirigibles exigen un mantenimiento intensivo. Han de llenarse con helio una vez a la semana y necesitan reparaciones frecuentes de la estructura exterior, que sufre las inclemencias del tiempo y del viento. «Parece que, en la práctica, los dirigibles no son tan simples como me gustaría», explica Tillotson, quien espera que con el tiempo se encuentren materiales que hagan de la idea un invento más económico.

—Adam Piore

NANOTECNOLOGÍA

El motor más pequeño

Hasta hace poco, el motor más pequeño del mundo medía 200 nanómetros, el equivalente a la cuadragésima parte de un glóbulo rojo. Hace unos meses, sin embargo, Charles Sykes y sus colaboradores de la Universidad Tufts batieron con creces esa marca: su motor se compone de una sola molécula y apenas mide un nanómetro. A diferencia de otros de mayor tamaño, el ingenio de Sykes no opera por medio de reacciones químicas ni de luz, sino con electricidad. «Se han propuesto muchos diseños», explica Johannes Seldenthuis, investigador de la Universidad de Tecnología de Delft, «pero este es el primero que ha dado buenos resultados».



Un motor nanoscópico rueda sobre una superficie de cobre.

El motor de Sykes consta de una molécula de sulfuro de butilo y metilo (BuSMe, formada por un átomo de azufre con un átomo de carbono a un lado y cuatro en el opuesto). Esta se coloca sobre una superficie de cobre, muy cerca de la cual se emplaza un microscopio electrónico. Cuando los electrones del microscopio excitan los de la molécula, esta comienza a rotar hacia delante y atrás; pero, dado que se trata de una molécula asimétrica, tiende a girar más en un sentido que en el otro, por lo que acaba desplazándose sobre la placa.

Aunque así descrito quizá no parezca un motor, el comportamiento de la molécula guarda grandes semejanzas con lo que sucede en las células de nuestro cuerpo. «Al observar un motor biológico en acción, tampoco suele parecernos que realice ninguna función útil; solo vemos cómo deambula de un lado para otro», apunta Sykes. Sin embargo, en nuestro cuerpo abundan las estructuras de este tipo: las membranas celulares se encuentran repletas de bombas que controlan el flujo de iones, así como de otras que desplazan sustancias en el interior celular.

En ello reside la importancia del motor de una sola molécula: «Si consiguiésemos controlarlos, podríamos llevar a cabo multitud de tareas», señala Sykes. Con réplicas fiables de las bombas celulares podrían realizarse experimentos muy eficientes, organizarlos para que cupieran en pequeños chips y reducir así el espacio, el coste y el tiempo necesarios para cada prueba.

—Rose Eveleth

FISIOLOGÍA

Vitaminas, minerales y microARN

«Somos lo que comemos.» Este antiguo dicho ha preocupado durante décadas a los consumidores que intentaban seguir una buena alimentación. ¿Qué pasaría si el dicho fuera literalmente cierto? ¿Y si algunos componentes de la comida que ingerimos llegaran a introducirse en los centros más profundos de control de nuestras células y se hicieran cargo de la expresión de genes fundamentales?

De hecho, así es como sucede en la realidad, según un estudio reciente sobre la transferencia de microARN entre plantas y animales dirigido por Chen-Yu Zhang, de la Universidad de Nanjing. El microARN consiste en pequeñas secuencias de nucleótidos, las piezas clave del material genético. El microARN no codifica proteínas, pero impide que ciertos genes den lugar a las proteínas que estos codifican. En el estudio, se analizaron muestras de sangre de treinta voluntarios para detectar la presencia de microARN procedente de vegetales cultivados, como el arroz, el trigo, las patatas o la coliflor.

Los resultados, publicados en *Cell Research*, revelaron que la sangre de los participantes contenía unos treinta tipos de microARN de vegetales que forman parte de nuestra comida habitual. Parece ser que los microARN pueden modificar también las funciones celulares. Se demostró así que cierto microARN del arroz se unía a los receptores que controlan la eliminación del colesterol LDL (el colesterol «malo») de la sangre. Al igual que las vitaminas y los minerales, el microARN podría representar un tipo de molécula funcional obtenida de los alimentos que no había sido tenida en cuenta hasta ahora.

El descubrimiento de que el microARN de las plantas interviene en la fisiología humana subraya también el hecho de que nuestros cuerpos son ecosistemas con un alto grado de integración. Zhang afirma que el hallazgo podría ayudar a comprender mejor el fenómeno de la coevolución, un proceso en el que los cambios genéticos en una especie desencadenan cambios en otra. Por ejemplo, nuestra capacidad de digerir la lactosa de la leche surgió después de que domesticásemos ganado vacuno. ¿Es posible que las plantas que cultivamos también nos hayan modificado? El estudio de Zhang nos recuerda, una vez más, que en la naturaleza nada existe de forma aislada.

—Anne-Marie C. Hodge



HISTORIA DE LA MEDICINA

Vibradores

Para ser un juguete sexual, las raíces del vibrador parecen desconcertantemente antisépticas y clínicas. Recetado como remedio para una curiosa enfermedad como es la histeria, durante decenios se aplicó clínicamente como una supuesta terapia médica.

Derivada de la palabra griega para «útero», la histeria aquejaba a mujeres con una energía sexual reprimida, o así lo creían los sanadores y los primitivos médicos. Especialmente proclives eran monjas, viudas y solteronas, pero durante la época victoriana muchas casadas fueron también presas de ella; a finales del siglo XIX, un par de afamados médicos estimaron que corrían ese riesgo las tres cuartas partes de las mujeres estadounidenses.

La prescripción del orgasmo clitoriano como tratamiento de la histeria se remonta a textos médicos del siglo I d.C. Era corriente que las mujeres recurrieran a los médicos, que las curaban valiéndose de las manos para producirles un «paroxismo», término que oculta lo que hoy conocemos como clímax sexual. Pero la estimulación manual resultaba lenta y, al menos para los médicos, tediosa. En su *The technology of orgasm: "Hysteria", the vibrator and women's sexual satisfaction*, la historiadora de la ciencia Rachel P. Maines relata que los médicos solían delegar ese trabajo en las comadronas.

El descubrimiento de la electricidad facilitó las cosas. A principios de la década de los ochenta del siglo XIX, Joseph Mortimer Granville patentó un vibrador electromecánico para aliviar los dolores musculares, y los médicos no tardaron en percatarse de que podría emplearse en otras zonas del cuerpo. La innovación acortó los tiempos de tratamiento y engrosó las carteras de los médicos.

Las pacientes estaban también contentas. Se multiplicó el número de clubes de salud que ofrecían la terapia vibratoria y el servicio se generalizó hasta el punto de que los fabricantes advirtieron a los médicos de que no se propasaran con el aparato: si satisfacían la demanda incesante de las pacientes, hasta las vibraciones mecánicas podrían resultar fatigosas. Hacia el cambio de siglo, en los catálogos de labores de aguja se anunciaban modelos para las féminas que desearan probar el tratamiento en casa, con lo que el vibrador se convirtió en el quinto aparato eléctrico, electrodoméstico, que accedió a los hogares, después de la máquina de coser, el ventilador, la tetera y la tostadora.

La validez del vibrador como instrumento médico declinó después de la década de los veinte del siglo pasado, cuando Freud, correctamente, identificó como sexual el paroxismo. En 1952, la Asociación Americana de Psiquiatría eliminó la histeria de su lista de enfermedades reconocidas. Cuando años después volvió a popularizarse el vibrador, a las mujeres ya no les hizo falta fingir una enfermedad para justificar su compra.

—Mara Hvistendahl

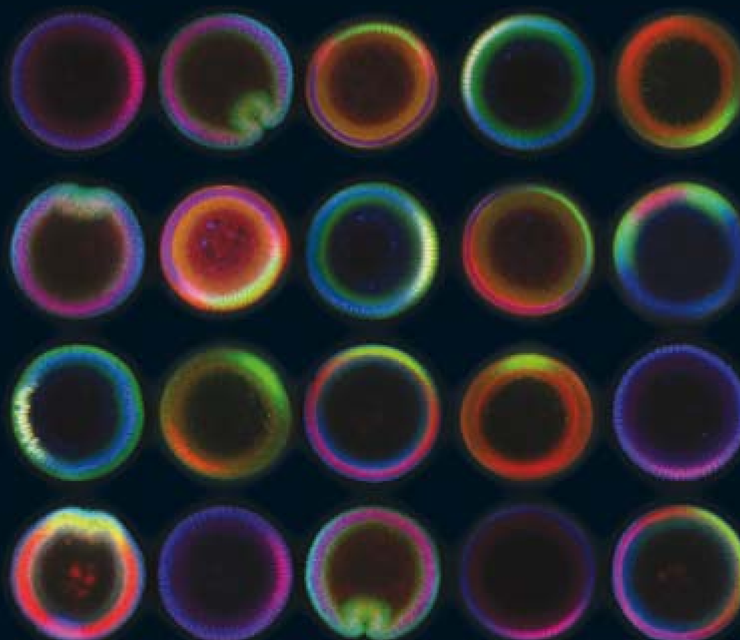


Los juguetes sexuales surgieron como instrumentos médicos para tratar la histeria femenina, convirtiéndose en sustitutos de la estimulación manual por los médicos.

¿QUÉ ES ESTO?

Por si las moscas: Para conseguir esta imagen que recuerda a Kandinsky, los investigadores tiñeron con anticuerpos secciones transversales de veinte embriones de moscas de la fruta, para revelar tres tipos de tejido: músculo, nervio y piel. La imagen, que fue incluida en fecha reciente en la exposición anual *El Arte de la Ciencia*, de la Universidad de Princeton, muestra los progresos conseguidos en este tipo de microscopía. Los científicos, que proceden de Princeton y del Instituto Tecnológico de Georgia, desarrollaron un nuevo dispositivo microfluídico que captura y coloca en posición vertical objetos diminutos, con más rapidez que nunca.

—Ann Chin



CORTESÍA DEL MUSEO BAKKEN (*anuncio*); CORTESÍA DE YOOSIK KIM Y STANISLAV Y. SHVARTSMAN, UNIVERSIDAD DE PRINCETON Y KWANGHUN CHUNG Y HANG LU, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE GEORGIA (*embriones*)

NEUROCIENCIAS

Memoria fotográfica

La esperanza de que se descubran nuevos medicamentos que ralenticen o detengan el inexorable declive de los pacientes con alzhéimer se ha visto frustrada repetidas veces en los últimos años. En un caso, Eli Lilly tuvo que poner fin al ensayo de un fármaco diseñado para evitar la producción de proteínas tóxicas en el cerebro, porque la cognición de los pacientes había empeorado mientras tomaban el fármaco.

Los científicos buscan ahora formas alternativas para ayudar a los pacientes en el ámbito informático. Una de las estrategias se basa en una pequeña cámara denominada SenseCam, que se lleva al cuello, como un collar, y que hace fotografías automáticamente durante el día. La idea no consiste en utilizar las imágenes para sustituir a la memoria, sino para estimularla. Cada fotografía puede servir como ayuda para recordar, como la magdalena de Proust, introduciéndose en la red de recuerdos que, en conjunto, definen la identidad de una persona.



La cámara SenseCam, desarrollada por Microsoft y comercializada por Vicon, utiliza una lente de gran angular para conseguir una visión amplia. A intervalos regulares, por ejemplo cada 30 segundos, una nueva imagen se almacena en la memoria de un gigaocteto. Cuando el portador de la cámara transita de una habitación a otra, un sensor percibe el cambio en la luz y hace que la SenseCam tome otra fotografía. Además, si una persona pasa cerca, un sensor infrarrojo detecta el calor corporal e indica que hay que hacer otra fotografía. El resultado es una cronografía elaborada a base de imágenes de los detalles cotidianos del propietario. Después, los pacientes o sus cuidadores introducen este registro electrónico en un ordenador para visualizar las imágenes, ya sea individualmente o en una secuencia cronológica.

Docenas de grupos están realizando pruebas piloto del dispositivo en pacientes con problemas de memoria. Estos estudios no son todavía significativos, pero aun así resultan atractivos. Steve Hodges, de Microsoft Research Cambridge, recuerda a un paciente con alzhéimer que describía una excursión de un día con su esposa, en España, en la que llevaba una SenseCam para obtener imágenes que pudiera «estudiar» después. Sin embargo, el paciente se preguntó cómo habían llegado a su destino. Entonces, su esposa señaló que se había quitado el dispositivo en el tren porque le daba vergüenza llevar puesto un cacharro extraño. Revisar las fotos podría ser una forma de ejercitar el cerebro para promover la memoria autobiográfica, recordando el momento y lugar de acontecimientos pasados. La capacidad de realizar este tipo de viaje en el tiempo mental es, precisamente, lo que destruye la enfermedad de Alzheimer.

Algunos siguen mostrándose escépticos con respecto al dispositivo. «Hemos constatado que las personas mayores, especialmente las que sufren problemas de memoria, suelen ser reacias a utilizar la tecnología», afirma Paul Aisen, médico e investigador de la Universidad de California en San Diego, que ha colaborado en el diseño de ensayos de medicamentos contra la enfermedad de Alzheimer. Si el dispositivo funciona, y aún es demasiado pronto para saberlo, la SenseCam simplemente haría que el deterioro fuese más lento. Sin embargo, un retraso del declive cognitivo de solo unos pocos años supondría un gran beneficio para la salud pública, dado que permitiría que los pacientes conservasen algunos vestigios de su memoria. Una imagen podría valer más que 1000 miligramos.

—*Gary Stix*

CORTESÍA DE MICROSOFT RESEARCH (*cámara*); WIKIMEDIA COMMONS/ LOKILECH/CC BY-SA 3.0 (*tronco*)

AGENDA

CONFERENCIAS

7 de marzo
Mente y cerebro: el fantasma en la máquina. ¿Disponemos de exorcistas eficaces?
Camilo José Cela Conde, Universidad de las Islas Baleares
Ciclo «Explorando las fronteras entre los saberes», Caixaforum
Palma de Mallorca
ifisc.uib-csic.es/outreach

9 de marzo
Mujer y ciencia: mi propia experiencia
Margarita Salas
Auditorio Mutua Universal
Barcelona
www.vhir.org > Actividades

14 de marzo
Paul Scherrer: cristales y átomos
José Manuel Sánchez Ron, Universidad Autónoma de Madrid
Ciclo «Creadores científicos»
Residencia de Estudiantes
Madrid
www.residencia.csic.es

EXPOSICIONES

Nombrando especies: Las *top ten* y el Proyecto BHLE
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

El enigma del ordenador
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Terrassa
www.mnactec.cat

OTROS

17 de marzo - Jornada
La enseñanza de la biología
Centenario de la Sociedad Catalana de Biología
La Pedrera, Barcelona
blocs.iec.cat/scb

Del 10 al 24 de marzo — Espectáculo y visita botánica
La voz de los árboles
Finca Agustí Pedro i Pons
Barcelona
www.ub.edu/futursinousestudiants/veu-arbres.htm



RADIOBIOLOGÍA

Efectos biológicos de los rayos X de baja energía

El tipo de radiación empleada en las mamografías podría inducir un mayor número de alteraciones cromosómicas que otras radiaciones más energéticas

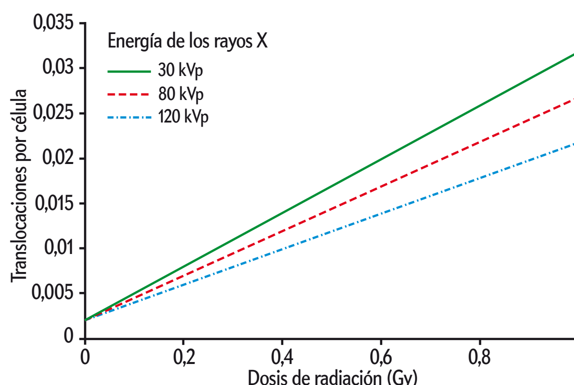
Las radiaciones ionizantes son aquellas que poseen energía suficiente para extraer electrones de los átomos, por lo que pueden desencadenar reacciones químicas y, en caso de incidir sobre tejidos vivos, provocar daños. Existen varias clases de radiaciones ionizantes: por un lado, las ondas electromagnéticas muy energéticas (rayos X y gamma); por otro, las radiaciones corpusculares, como las partículas alfa (núcleos de helio), las partículas beta (electrones) o los neutrones.

Los rayos X presentan numerosas aplicaciones en medicina, por lo que conocer con detalle sus efectos sobre las células reviste un enorme interés. En protección radiológica, se suele dar por sentado que los rayos X y gamma provocan las mismas alteraciones, con independencia de su energía. Sin embargo, algunas investigaciones recientes sugieren que los rayos X de unos 30 kilovoltios pico (kVp) podrían ejercer un efecto biológico superior al de otras radiaciones más energéticas. Dado que este es el tipo de radiación que se emplea en las mamografías, tales estudios cuestionan la relación entre el riesgo y el beneficio de la práctica generalizada de mamografías como método de detección precoz del cáncer de mama.

Existen diferentes métodos para evaluar los efectos de una exposición radiológica: el estudio de la supervivencia celular, la transformación celular o la inducción de tumores en animales, entre otros. Uno de los más reconocidos consiste en investigar las alteraciones cromosómicas radioinducidas. Estas se producen cuando la radiación interacciona de manera directa con la molécula de ADN, o bien cuando, al incidir sobre otras sustancias (agua, sobre todo), se generan radicales libres y estos reaccionan con el material hereditario.

A fin de evaluar si el daño cromosómico producido por los rayos X de 30 kVp difiere del generado por los de energías más elevadas, nuestro grupo analizó las alteraciones cromosómicas provocadas en linfocitos humanos. Nuestros resultados fueron publicados en julio de 2008 y febrero de 2011 en *Radiation Research*. Para ello, empleamos técnicas de hibridación in situ fluorescente (FISH); un procedimiento que, gracias al uso de sondas de ADN marcadas con fluorocromos (grupos químicos que confieren fluorescencia), permite hacer visibles secuencias o fragmentos específicos del genoma. Irradiamos muestras de sangre periférica con distintas dosis de rayos X de energías de 30, 80 y 120 kVp, con rayos gamma emitidos por el isótopo de cobalto 60 y, por último, con partículas alfa.

Para cada tipo de radiación, analizamos la relación entre la dosis aplicada y las alteraciones cromosómicas causadas (curvas dosis-efecto); en concreto, la aparición de cromosomas dicéntricos (aquellos que, producto de una reparación anómala, poseen dos centrómeros) y de translocaciones (el desplazamiento de un fragmento de material hereditario a otra posición del genoma). Cabe señalar que las translocaciones constituyen una anomalía estable, puesto que el cromosoma resultante posee un único centrómero y, por tanto, puede sobrevivir a la mitosis y transmitirse a la descendencia. Los cromosomas dicéntricos, en cambio, se consideran alteraciones inestables, ya que los dos centrómeros pueden dificultar la segregación durante la mitosis.



Curvas dosis-efecto para las translocaciones inducidas por rayos X de diferente energía. En el eje de abscisas se representa la dosis de radiación para exposiciones de entre 0 y 1 gray (1 Gy equivale a 1 julio de radiación absorbida por kilogramo de material irradiado).

A la hora de cuantificar el daño provocado por una clase de radiación determinada, este suele compararse con el que genera la misma dosis de una radiación de referencia (por lo general, rayos X de 250 kVp). El cociente entre ambos se denomina eficacia biológica relativa (EBR); cuanto más elevada resulte dicha proporción, más dañina se considera la radiación analizada. En nuestros experimentos, medimos la «EBR máxima a bajas dosis» (EBR_M), una cantidad obtenida a partir del término lineal (el dominante cuando la exposición es baja) de las curvas dosis-efecto.

Al emplear como referencia rayos X de 120 kVp, obtuvimos una EBR_M para la radiación de 30 kVp de 1,73 para la aparición de cromosomas dicéntricos, y de 1,51 para translocaciones. Por otro lado, utilizando como referencia la curva para rayos gamma de 1,25 megaelectronvoltios (MeV), la EBR_M estimada fue de 1,79 y de 2,08, respectivamente. Estos resultados, que concuerdan con los obtenidos por otros autores, indican que la eficacia biológica relativa de los rayos X de 30 kVp podría ascender al doble de lo que se pensaba hasta ahora.

Reparaciones defectuosas

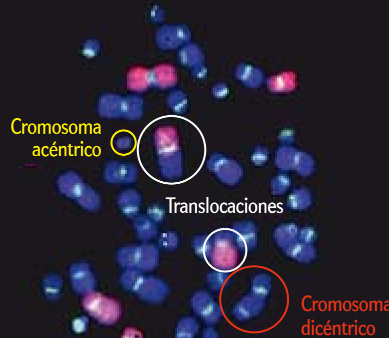
Otro tipo de anomalías cromosómicas analizadas por nuestro grupo fueron las alteraciones incompletas. Estas ocurren cuando los extremos que se generan tras una rotura del material hereditario no se reorganizan. Estas anomalías pueden detectarse con facilidad utilizando sondas de ADN que hibridan con las secuencias teloméricas localizadas en los extremos de los cromosomas. La presencia de un fragmento cromosómico sin señales teloméricas en uno o ambos extremos indica la aparición de una alteración no reorganizada o incompleta.

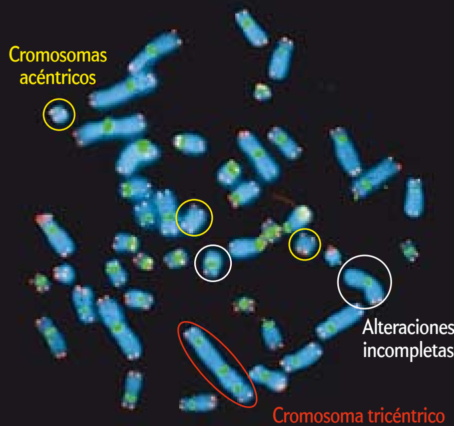
Para estimar ese tipo de daño, se determina la proporción entre alteraciones completas e incompletas. Nuestros resultados mostraron que, para rayos X con energías de 80 y 120 kVp, así

LOS CROMOSOMAS COMO SENSORES

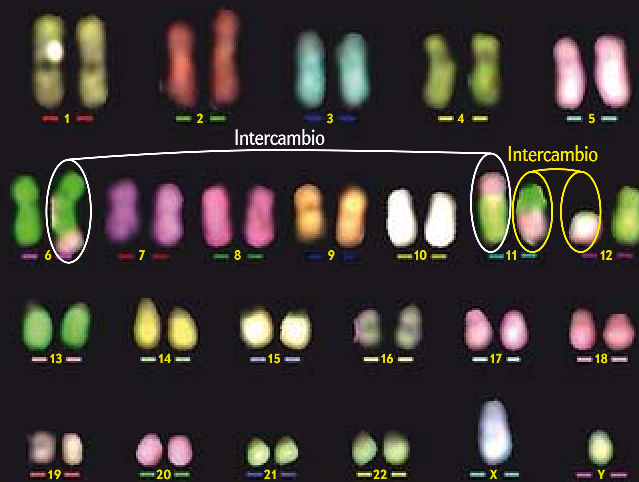
Mediante la utilización de sondas de ADN marcadas con fluorocromos, la técnica de hibridación in situ fluorescente (FISH) hace visibles fragmentos o secuencias específicas del genoma. Ello permite estudiar las alteraciones cromosómicas producidas cuando se bombardean las células con radiaciones ionizantes, como los rayos X.

Empleo de sondas que hibridan con la totalidad de los cromosomas 1, 4 y 11 (*rosa*) y de una sonda pancentromérica, que marca todos los centrómeros (*celeste*). La imagen muestra la aparición de translocaciones entre los cromosomas hibridados y los contrateñidos (*azul*), así como la producción de un cromosoma dicéntrico y su fragmento acéntrico a partir de dos cromosomas no hibridados.





Empleo de sondas panteloméricas que hibridan con todos los telómeros (*puntos rosas*) y de una sonda pancentromérica (*verde*). Los fragmentos cromosómicos carentes de telómeros en alguno de sus extremos indican una rotura del material hereditario que no ha sido reparada (alteración incompleta). Se aprecian también tres fragmentos acéntricos y uno tricéntrico. La presencia de señales teloméricas en ambos extremos indica que se trata de anomalías completas (reparadas, aunque de manera errónea).



La técnica de coloración múltiple mFISH permite teñir cada pareja de cromosomas con un color distinto. Los círculos blancos indican un intercambio entre los cromosomas 6 y 11; los amarillos, entre el 11 y el 12.

CORTESÍA DE LOS AUTORES, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA

como para la radiación gamma, se producían unas 4 alteraciones incompletas por cada 10 completas. Sin embargo, para rayos X de 30 kVp, la proporción ascendía a 6 por cada 10.

Por último, empleamos la técnica de coloración múltiple (mFISH) con el objetivo de marcar cada pareja de cromosomas con un color distinto y localizar así todas las anomalías debidas a un intercambio aberrante de fragmentos de ADN. En particular, analizamos las alteraciones cromosómicas complejas, aquellas formadas por un mínimo de tres roturas en el ADN de dos o más cromosomas. Nuestros resultados indicaron que los rayos X de 30 kVp se mostraban 1,6 veces más eficientes en provocar este tipo de alteraciones que los rayos X de 120 kVp.

Cabe señalar que, por lo general, la inducción de alteraciones incompletas y complejas resulta característica de radiaciones con una elevada transferencia lineal de energía (TLE); es decir, aquellas que producen un gran número de ionizaciones por unidad de longitud de material penetrado. Un ejemplo tal lo proporcionan las partículas alfa, con las que la proporción de alteraciones incompletas frente a completas es de 1 a 1. La eficiencia de las radiaciones de elevada TLE a la hora de producir esta clase de alteraciones suele asociarse a su patrón de deposición de energía: al tratarse de radiaciones densamente ionizantes, su interacción con el ADN produce múltiples tipos de daño, por lo que sus efectos resultan más difíciles de reparar. Los rayos X, sin embargo, presentan una baja TLE.

Nuestras investigaciones cuestionan la opinión generalizada de que todas las radiaciones ionizantes no corpusculares (fotones) provocan los mismos efectos biológicos. No obstante, estos resultados han de circunscribirse al estudio realizado y al campo de la radiobiología, y no deben extrapolarse más allá. Las dosis utilizadas en nuestros estudios son mucho más elevadas que las que se reciben en una exploración radiológica. Determinar los efectos sobre la salud de las radiaciones ionizantes a dosis bajas exige realizar estudios estadísticos (epidemiológicos) en los que el objeto de análisis es una población, no un individuo.

—Joan-Francesc Barquinero, Marta Mestres y Leila Benkhaled
Departamento de biología animal, biología vegetal y ecología
Universidad Autónoma de Barcelona

ECOLOGÍA

Evolución de las poblaciones de jabalí

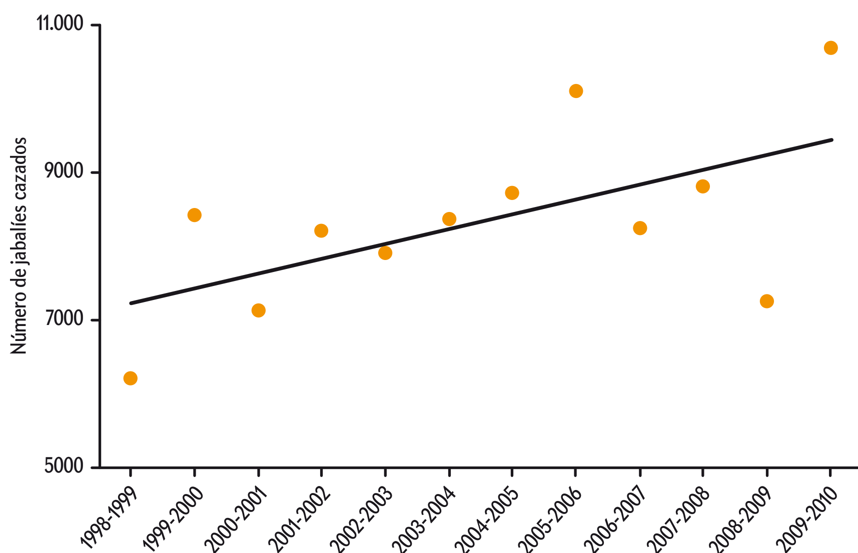
La explosión demográfica que ha experimentado la especie en los últimos decenios guarda relación con los cambios en el uso del suelo

El jabalí (*Sus scrofa* Linnaeus 1758) es, en la actualidad, el ungulado silvestre con la distribución más amplia en la península ibérica. Buena parte de esta situación se debe a su enorme plasticidad ambiental, pues se adapta a casi cualquiera de los entornos presentes en el territorio, y a su elevada capacidad reproductora.

Al igual que ocurre con otros ungulados silvestres de la península ibérica y Europa, el jabalí ha experimentado una notable expansión en las últimas décadas, no solo desde un punto de vista numérico (al alcanzar sus poblaciones una mayor densidad), sino también en lo referente a sus áreas de distribución. Hoy hallamos el jabalí en todo Aragón, y se ha calculado que la superficie ocupada por el animal en esa zona ha aumentado más de ocho veces con respecto a la de 1850. En términos de abundancia, la especie presenta una tendencia claramente creciente en la misma región; en algunas áreas del Pirineo aragonés la población se ha triplicado en tan solo cinco años. En Andalucía, el área ocupada por el jabalí se extendió casi un 30 por ciento desde los años sesenta hasta los noventa del siglo xx; en los próximos años se prevé un incremento aún mayor. La evolución de las bolsas de caza (número de jabalíes abatidos al año en actividades cinegéticas legales) en Ciudad Real, una de las provincias con mayor tradición venatoria de la península, no hace más que evidenciar esa situación de expansión, con más de 10.000 ejemplares cazados en la temporada 2009-2010. Estas cifras representan tan solo algunos ejemplos de una situación generalizable a la mayor parte de las regiones españolas y a muchas de las europeas.

Entre las causas de esa proliferación destacan la disminución de depredadores naturales, los cambios en los usos del suelo y la regulación en materia de caza. A nuestro modo de ver, todas estas causas poseen un denominador común: el abandono de los usos tradicionales en las zonas rurales, sobre todo de la agricultura, los aprovechamientos forestales y la ganadería. El fenómeno ha propiciado una renaturalización del medio y, por tanto, una mayor disponibilidad de recursos básicos (refugio y alimento) para la fauna silvestre. Ello, unido a una mayor conciencia social en materia de conservación de la biodiversidad, hace que el jabalí y otros ungulados silvestres encuentren en la actualidad condiciones más favorables que antaño para su crecimiento.

A esas causas «naturales» debemos añadir el efecto del manejo que, con intereses cinegéticos, se hace de las poblaciones en algunas regiones de la península, principalmente del centro y del sur. El manejo cinegético en estas zonas se ha intensificado en las últimas décadas. Entre otras intervenciones, cabe destacar el aporte de alimento para paliar la escasez del mismo en el monte en determinados períodos o para potenciar la condición corporal de los animales. Ello permite mantener una densidad poblacional elevada, lo que se traduce en un mayor rendimiento cinegético. Estas estrategias vinculadas a la gestión de la caza son, por



Según los datos sobre el número de jabalíes cazados legalmente en la provincia de Ciudad Real entre las temporadas cinegéticas 1998-1999 y 2009-2010, la población de estos ungulados silvestres muestra una tendencia al alza.



Concentración de jabalíes en un comedero de una finca con manejo intensivo en Sierra Morena.

FUENTE: CONSEJERÍA DE SANIDAD ANIMAL DE LA JUNTA DE COMUNIDADES DE CASTILLA-LA MANCHA (*gráfica*); PELAYO ACEVEDO (*jabalíes*)

tanto, otros de los factores responsables de la expansión de la especie.

Gestión de las poblaciones

Ante tal situación, parece razonable que las administraciones apliquen medidas de gestión con el fin de evitar los efectos negativos ligados al crecimiento desmesurado de las poblaciones de jabalí. El pilar básico de dicha gestión es la monitorización, es decir, el seguimiento del estado de las poblaciones a lo largo del tiempo; en concreto, de su distribución, abundancia y estado sanitario. La monitorización debe contar con métodos de trabajo adecuados y eficaces. En el caso del jabalí, y dados sus hábitos esquivos y su patrón de actividad eminentemente crepuscular y nocturno, la monitorización requiere mayor esfuerzo que en otros ungulados silvestres. Por ello, en los últimos años se han desarrollado nuevas metodologías que facilitan la estimación de su abundancia relativa, como la que se basa en los indicios de presencia (principalmente de excrementos, aunque en determinadas circunstancias también podrían usarse las hozaduras). Además de esos indicios, resulta de gran valor la información que se pueda obtener de las actividades cinegéticas, como el número de animales cazados respecto a los vistos, ya que si los datos se registran con el rigor suficiente, pueden emplearse también como un indicador de abundancia. La información de las actividades cinegéticas presenta además otra ventaja: permite acceder a datos de los animales cazados, como la proporción de sexos y edades, que resultan de gran valor para determinar el estado de la población.

A modo de conclusión, planteamos que ante la explosión demográfica que está experimentando el jabalí en los últimos decenios se hace necesario el diseño y la implementación de un plan de gestión de la especie. Afortunadamente, en los últimos tiempos se ha generado un amplio conocimiento científico que resulta de utilidad para la gestión. Cabe citar el desarrollo de herramientas para monitorizar la dinámica de las poblaciones de jabalí o la determinación de zonas donde las enfermedades pudieran acarrear problemas graves a la especie. Los responsables de la gestión pueden aprovechar esos datos para idear un plan que, dada la ubicuidad de la especie, debería aplicarse a nivel nacional.

—Pelayo Acevedo
Dpto. de biología animal
Universidad de Málaga
Francisco Ruiz Fons
Unidad de sanidad animal
Instituto de Investigación en Recursos Cinegéticos (UCLM-CSIC-JCCM)

BIOLOGÍA CELULAR

Cortar y pegar: restauración de la función celular mediante corrección genética

Las técnicas de edición genética y las células madre pluripotentes inducidas podrían brindar una oportunidad sin precedentes para aunar los ámbitos terapéuticos de las células madre y la terapia génica tradicional en pos de los propósitos de la medicina regenerativa

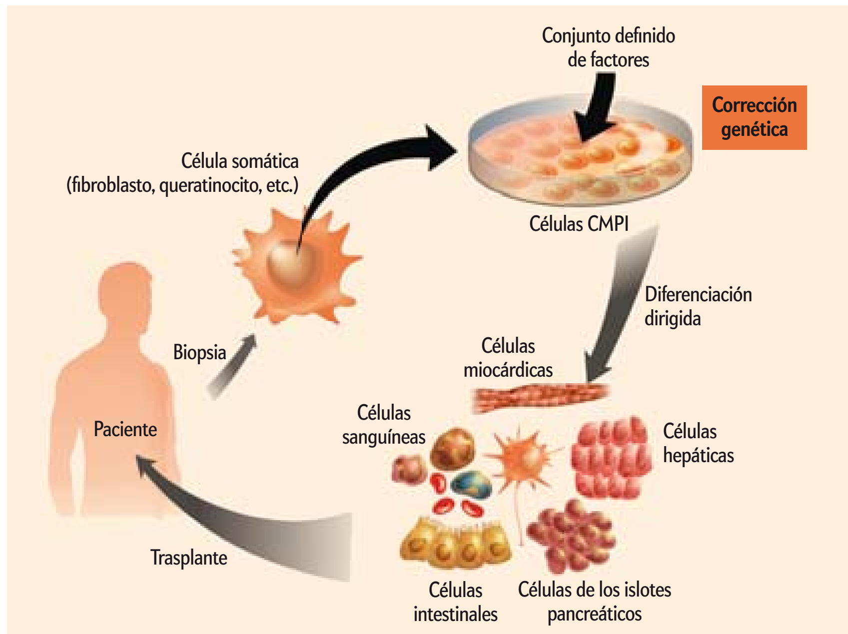
La aplicación de las técnicas de corrección genética a las enfermedades monogénicas permite reemplazar los genes mutados por su versión normal. Estos procedimientos, combinados con el uso de células madre pluripotentes inducidas (CMPI), podrían permitir, en última instancia, la curación o paliación de innumerables enfermedades humanas.

La primera demostración de mejora fenotípica lograda por medio de la corrección genética de las mutaciones llegó en 2007. En un modelo de ratón afectado por anemia falciforme, Rudolf Jaenisch, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores corrigieron el genoma de CMPI derivadas de ratón, reemplazando el gen defectuoso de la hemoglobina por su versión funcional. Una vez corregidas, se incitó a las CMPI a que generaran células madre sanguíneas (hematopoyéticas) que restauraron la función normal de los eritrocitos.

En fecha posterior, dos trabajos demostraron la curación de la hemofilia A gracias al trasplante heterólogo de células endoteliales derivadas de CMPI. Los defectos hemofílicos fueron reparados gracias al trasplante de células normales o mediante la corrección in vivo del gen alterado responsable de la expresión del factor VIII defectuoso. Los estudios realizados por Xu y sus colaboradores, del Instituto del Cáncer de Nevada, en EE.UU., no implicaron la corrección genética de las CMPI generadas, sino que eran más bien una aplicación preliminar demostrativa de que las células corrientes diferenciadas en CMPI pueden actuar como un injerto «dominante positivo» que alivia el fenotipo de la enfermedad. Por otra parte, el equipo de Hojun Li, del Hospital Infantil de Filadelfia, utilizó las nucleasas con dedos de cinc (ZFN, de *zinc finger nucleases*), enzimas capaces de cortar las hebras de ADN, con el fin de lograr la corrección y mejora in vivo de la sintomatología hemofílica sin recurrir a la generación de CMPI o al trasplante de células. La corrección genética de la hemofilia mediante las ZFN permitió sustituir el gen mutado por su versión normal mediante un abordaje más afín al campo de la terapia génica.

Desde entonces, diversos grupos de investigación han logrado producir CMPI y corregir defectos en pacientes afectados por otras enfermedades genéticas: entre estas, el síndrome de progeria, la enfermedad de Parkinson, la atrofia girata, y enfermedades sanguíneas como talasemias, la anemia de Fanconi y la anemia falciforme o drepanocítica. Aun cuando estos estudios no confirmaron la mejora sintomática in vivo, la mayor parte demostró la cura de los defectos celulares in vitro una vez que las células madre se diferenciaron en los correspondientes tejidos específicos. Estos modelos in vitro requieren menos tiempo para que aparezcan los síntomas de la enfermedad, por lo que constituyen una herramienta adecuada para los estudios de corrección genética.

Más aún, los métodos basados en el uso de vectores elaborados con partículas adenovirales (HDAdV) han posibilitado la sustitución de grandes fragmentos de ADN y, tal vez, podrían permitir la corrección por recombinación homóloga de genes portadores de mutaciones en distintas posiciones de su secuencia, o inclu-



so de ciertas deleciones o duplicaciones, todo ello en un solo paso.

Los métodos desarrollados no acarrean la aparición de efectos inespecíficos que alteren la integridad epigenética y genómica. Así pues, el uso de las nuevas técnicas de corrección genética abarca un amplio abanico de aplicaciones que van más allá de la corrección de genes y la medicina regenerativa, y comprende el análisis de los mecanismos moleculares responsables de la aparición y progresión de la enfermedad.

A tenor de las anomalías epigenéticas descritas y de las anomalías genéticas halladas en las CMPI, las células madre embrionarias (CME) podrían constituir un complemento adecuado con vistas a mejorar la seguridad y la eficacia de la corrección genética. Además, podrían resultar útiles para la modificación de las células con la finalidad inversa, es decir, la generación de CME que recapitulen enfermedades concretas. Dirk Hockemeyer, del Instituto Whitehead de Investigación Biomédica en Cambridge, y sus colaboradores han descrito por primera vez el uso de una familia de nucleasas vegetales, las TALEN, a modo de instrumento para la corrección genética de células humanas. Se trata de enzimas de restricción capaces de reconocer secuencias específicas en el ADN y que, por tanto, pueden ser dirigidas a lugares concretos del genoma, de forma similar a las ZFN. En concreto, el trabajo describe su desarrollo y uso en la corrección genética de hasta cinco *loci* en ambos tipos de células madre pluripotentes, CME e CMPI. Su eficiencia y especificidad resultan notables y equiparables a las de metodologías más tradicionales como las ZFN, si bien adolecen de algunas desventajas respecto a la corrección mediada por HDAdV.

De forma similar, F. Soldner, del Instituto Whitehead de Cambridge, y sus colaboradores han descrito la corrección genética del gen de la alfa-sinucleína, cuyas variantes mutadas se han vinculado a una mayor probabilidad de sufrir párkinson. En este trabajo, los autores no solo describieron las técnicas de ingeniería genética y la corrección de este gen mediante las ZFN, sino que también demostraron la generación de estirpes de CME específicas del párkinson.

En fecha reciente, se han desarrollado técnicas que aúnan nucleasas y transposones, elementos genéticos capaces de moverse por el genoma. El equipo encabezado por Kosuke Yusa, del Instituto Sanger Wellcome Trust, consiguió culminar la corrección genética sin dejar rastro de cicatrices genómicas, una secuela habitual de otras metodologías basadas en nucleasas y de métodos como el sistema de Cre-LoxP, de amplio uso. Un hecho destacable es que la corrección tiene lugar con bastante frecuencia en los dos alelos del gen mutado, con valores que alcanzan hasta el once por ciento de eficiencia bialélica. Por otra parte, aunque las CMPI y las células diferenciadas derivadas de las mismas adquirieron ciertas mutaciones durante los procesos de reprogramación, corrección genética y cultivo, estas no obstaculizaron la corrección fenotípica o sintomática en los modelos animales estudiados. Los parámetros fisiológicos de los especímenes retornaron a la normalidad sin que aparecieran tumores.

Este y otros trabajos publicados durante el último año destacan la necesidad de ejercer un control exhaustivo tanto de las células CMPI como de sus derivados diferenciados en el contexto de usos específicos, más que en el número absoluto de mutaciones adquiridas. En otras palabras, apuntan a la necesidad de desechar las células madre pluripotentes portadoras de mutaciones que comprometan la función de las células diferenciadas, en favor de estirpes cuyas alteraciones no obstaculicen la recuperación y la mejora sintomática de las enfermedades tras el trasplante celular. Según este criterio, se primaría la funcionalidad en un contexto particular en lugar del número absoluto de mutaciones observadas.

En resumen, la corrección genética de mutaciones vinculadas a enfermedades humanas, así como la generación de estirpes isogénicas de CMPI/CME, contribuirá al desarrollo de sistemas experimentales para el estudio de enfermedades in vitro que serán útiles para el análisis y descubrimiento de nuevos fármacos. Además, permitirá combinar técnicas de terapia génica y medicina regenerativa en la elaboración de nuevos tratamientos terapéuticos. A pesar de que ambos campos de estudio son relativamente nuevos, el ritmo vertiginoso al que se suceden los descubrimientos hace pensar que en un futuro no muy lejano podamos convertir en realidad algunos de nuestros sueños más anhelados. Podremos asistir así a una de las épocas más revolucionarias de la medicina personalizada.

—Ignacio Sancho Martínez
Laboratorio de expresión génica,
Instituto Salk de Estudios Biológicos,
La Jolla, California.
Guang-Hui Liu
Laboratorio de expresión génica,
Instituto Salk de Estudios Biológicos,
La Jolla, California, y Laboratorio
de biomacromoléculas,
Instituto de Biofísica,
Academia de Ciencias de Pekín
Juan Carlos Izpisúa Belmonte
Laboratorio de expresión génica,
Instituto Salk de Estudios Biológicos,
La Jolla, California, y Centro de
Medicina Regenerativa, Barcelona

Artículo original publicado en *Cell Research*, vol. 22, págs. 283-284, 2012 (en línea en diciembre de 2011). Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

Constantes que corren

Un experimento reciente demuestra que, al igual que ocurre en electrodinámica cuántica, la constante de acoplamiento efectiva del grafeno cambia con la energía

Las mejores épocas de la física son aquellas en las que especialistas de áreas diferentes se enfrentan a un problema de interés común. Esa es la situación en la que hoy se encuentra la investigación sobre el grafeno. La naturaleza relativista de sus cuasipartículas (los portadores de carga en el material) quedó confirmada poco después de que se consiguiera aislar las primeras monocapas de grafito. En una primera aproximación, estos portadores de carga obedecen a una ecuación similar a la que en electrodinámica cuántica (QED) describe la interacción entre partículas relativistas cargadas. La analogía, sin embargo, parece ir más allá. Un estudio realizado en fecha reciente por Daniel C. Elias, de la Universidad de Manchester, y sus colaboradores ha revelado que, al considerar pequeñas variaciones en la energía de las cuasipartículas, la forma cónica característica de las bandas de valencia y conducción del grafeno cambia su pendiente a medida que la energía disminuye. El resultado implica que la analogía entre el grafeno y la física de partículas es más profunda de lo que se sospechaba. En particular, conlleva que la constante de acoplamiento elctromagnética del grafeno se renormaliza, tal y como ocurre en electrodinámica cuántica.

La naturaleza se rige por cuatro interacciones fundamentales de muy diferente magnitud. La constante de acoplamiento característica de la gravedad (la menor de ellas) y la de la interacción fuerte (que gobierna el comportamiento de los quarks) difieren en 40 órdenes de magnitud. La interacción electromagnética se encuentra entre esos dos extremos. Pero, a pesar de su nombre, el valor de dichas «constantes» no permanece invariable: su magnitud cambia en función de la energía a la que se realiza el experimento que las determina.

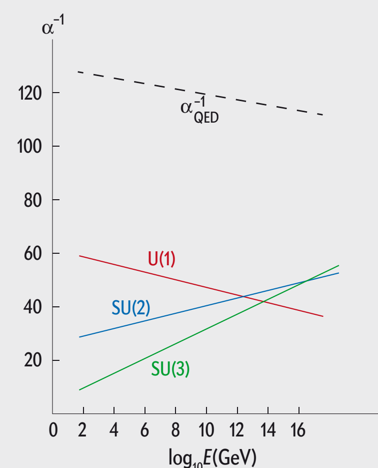
La constante de estructura fina de la electrodinámica cuántica, α_{QED}, muestra un valor aproximado de 1/137 cuando la energía de las partículas es del orden de la masa del electrón (unos 0,5 megaelectronvoltios). Sin embargo, aumenta hasta 1/128 en experimentos como los que se efectuaban en el Colisionador de Electrones y Positrones del CERN (el antecesor del LHC), donde se alcanzaban energías de unos 90 gigaelectronvoltios. Al hablar de estas variaciones, los físicos suelen decir que las constantes de acoplamiento «corren» con la energía. Ese comportamiento se encuentra estrechamente relacionado con la renormalización: la solución al problema de las divergencias que aparece en teoría cuántica de campos cuando, al calcular cantidades observables, se obtienen resultados infinitos.

Una de las propiedades más notables que se observaron en el grafeno poco tiempo después de sintetizarlo fue que, de manera efectiva, los portadores de carga se movían como si fuesen partículas sin masa. ¿Cómo entender algo así? La electrodinámica cuántica describe el movimiento de los electrones libres en el vacío. Estos interaccionan con otras partículas cargadas mediante el intercambio de fotones, donde α_{QED} representa una medida de la intensidad de dicha interacción. Los portadores de carga del grafeno no son electrones reales, sino grados de libertad efectivos que poseen la misma carga y espín que el electrón. Estas cuasipartículas emergen a partir de las complicadas interacciones entre los orbitales de la red hexagonal de carbono que conforma el grafeno. Por tanto, resulta sorprendente —y una feliz coincidencia— que, en numerosos aspectos, se comporten como electrones libres.

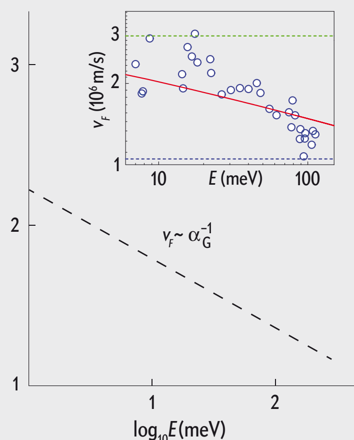
El experimento realizado por Elias y sus colaboradores lleva la analogía con la electrodinámica cuántica hasta límites insospechados. La constante de acoplamiento electromagnética se define en función de otras dos constantes fundamentales: la carga del electrón, e, y la velocidad de la luz en el vacío, c. En las unidades adecuadas, la relación es muy sencilla: $\alpha_{QED} = e^2/4\pi c$. En el grafeno, la forma funcional de la constante de aco-

RENORMALIZACIÓN EN EL GRAFENO

Las primeras formulaciones de la teoría cuántica de campos predecían que las cantidades físicas fundamentales, como la carga del electrón, tomaban valores infinitos. Este «problema de las divergencias» se resolvió gracias a la renormalización, es decir, la redefinición de los parámetros de la teoría en función de la escala de energía del sistema. Ello explica que, en el modelo estándar de las partículas elementales, el valor de las constantes de acoplamiento de las diferentes interacciones ($SU(3) \times SU(2) \times U(1)$) cambie con la energía (*izquierda*). Un experimento reciente ha demostrado que lo mismo ocurre con la constante de acoplamiento efectiva en el grafeno, α_G (*derecha*).

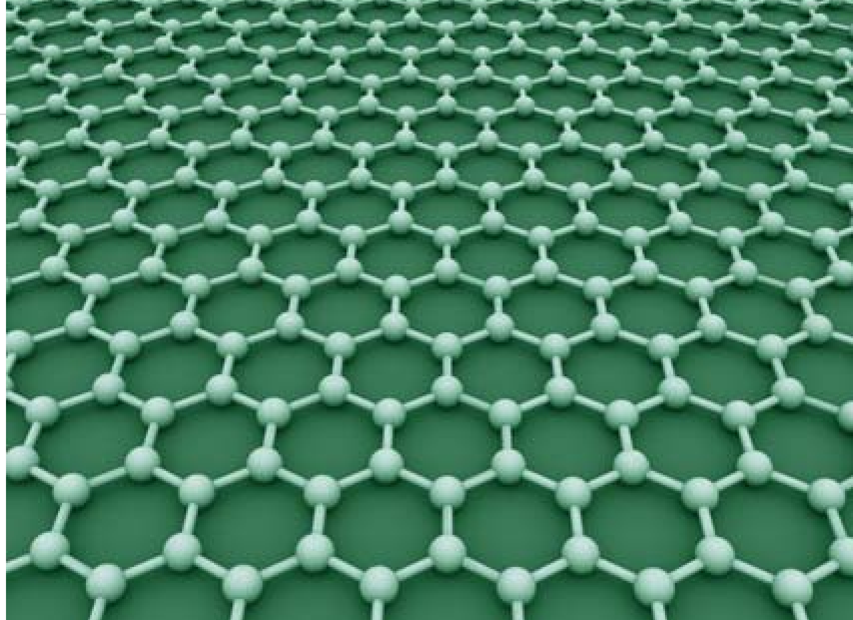


El valor de la constante de acoplamiento en electrodinámica cuántica, (α_{QED}), cambia de manera logarítmica con la energía a la que se realiza el experimento.



La constante de acoplamiento efectiva en el grafeno cambia con la energía debido a la renormalización de la «velocidad de Fermi» del material, v_F, formalmente análoga al de la velocidad de la luz. El inserto muestra los valores experimentales obtenidos por Elias y sus colaboradores.

FUENTE: M.A.H. VOZMEDIANO EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 7, PÁGS. 671-672; 2011 (*gráficas*)



plamiento α_G es idéntica, pero en ella se reemplaza la velocidad de la luz por la «velocidad de Fermi», $v_F \approx c/300$. La constante de acoplamiento en electrodinámica cuántica cambia con la energía porque lo que se renormaliza es la carga del electrón; *c* es una constante genuina. En el caso del grafeno, la carga del electrón permanece constante; la renormalización afecta en este caso a la velocidad de Fermi, la cual decrece a medida que la energía aumenta. El resultado es que, en ambos casos, la relación que describe cómo cambia la constante de acoplamiento exhibe la misma forma funcional.

La idea de que el grafeno podría experimentar dicha renormalización se propuso casi una década antes de que se lograse sintetizar el material. Si la verificación experimental ha tardado tanto en llegar, se debe a que este comportamiento solo se torna evidente en un intervalo de energías de aproximadamente 1 electronvoltio en torno al punto de Dirac (aquel en el que las bandas de valencia y de conducción del grafeno se tocan). Por otro lado, la renormalización de la constante de acoplamiento es logarítmica, por lo que medir con precisión sus variaciones requiere tomar datos a energías que difieran entre sí varios órdenes de magnitud. En este sentido, el experimento de Elias y sus colaboradores constituye una verdadera proeza, pues explora la estructura electrónica del grafeno a energías del orden de una fracción de miliectronvoltio del punto de Dirac, una región inaccesible con las técnicas habituales.

El resultado no solo valida la analogía entre la física del grafeno y la electrodinámica cuántica, sino que mejora nuestra comprensión acerca de las interacciones electrónicas en este material, un aspecto que ha sido hasta ahora objeto de polémica entre la comunidad científica [*véase* «Electrónica del grafeno», por J. González Carmona, M.ª A. Hernández y Francisco Guinea; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010].

—María A. H. Vozmediano
Instituto de Ciencia de Materiales (CSIC)
Madrid

Artículo original publicado en *Nature Physics*, vol. 7, págs. 671-672, 2011. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2011

MATEMÁTICAS

Detección del cáncer

Estadística de los falsos positivos

Parece como si, cada pocos meses, surgiera un nuevo estudio que delatase la ineficacia de otro programa para la detección del cáncer a gran escala. En 2009, el Grupo de Trabajo de los Servicios de Prevención de EE.UU. sugirió que muchas mujeres deberían someterse a las mamografías más tarde y con menos frecuencia de lo que se recomendaba antaño, porque al parecer las pruebas anuales aportaban pocas o ninguna ventaja. En fecha reciente, este mismo grupo ha hecho una declaración pública aún más incisiva, relativa a la prueba de antígenos destinada a detectar el cáncer de próstata: trastorna las vidas de mucha gente, pero, en definitiva, no las salva.

Los investigadores del Instituto Dartmouth de Política Sanitaria y Práctica Clí-

nica afirmaron hace poco que el hecho de que una mamografía (en EE.UU. se realizan casi 40 millones al año) detecte un cáncer no significa que salve una vida. Este grupo constató que, a pesar de que cada año se detectan unos 138.000 cánceres de mama, la prueba no ayudó a la inmensa mayoría de las 120.000 a 134.000 mujeres afectadas. O bien el cáncer crecía con tanta lentitud que no suponía un problema o habría sido tratado con éxito aunque hubiera sido descubierto más tarde, o bien era tan agresivo que poco se podía hacer. Las radiografías del pecho para detectar el cáncer de pulmón y las pruebas de Papanicolau para el cáncer de cuello de útero han sido blanco de críticas similares.

El mejor tratamiento y las pruebas más adecuadas dependen de cada caso, por supuesto, pero todas las pruebas están influidas por un factor numérico. Es algo de sobra conocido por los matemáticos, pero conviene recordarlo: cuando se está buscando algo poco frecuente (un cáncer o, por ejemplo, terroristas), un resultado positivo a menudo resulta ser falso. O bien el letal cáncer «detectado» no está ahí, o es de un tipo que no matará al paciente.

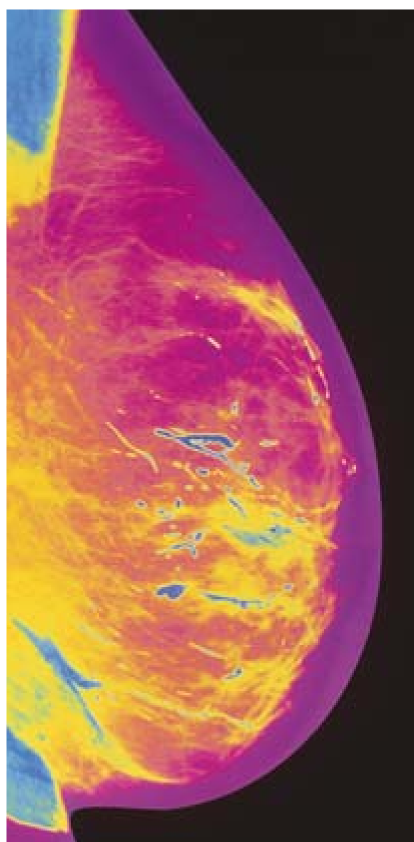
En lugar de estudiar las cifras de prevalencia de dichos cánceres y la sensibilidad y especificidad de cada una de las pruebas, vamos a considerar, a título de ejemplo, el cáncer X, que, supongamos, afecta a un 0,4 por ciento de las personas de una población (dos de cada 500) en un momento concreto. Supongamos también que, si una persona padece este cáncer, hay un 99,5 por ciento de posibilidades de que la prueba arroje un resultado positivo. Por otra parte, si una persona no lo sufre, supondremos que tiene una probabilidad del 1 por ciento de que la prueba ofrezca un resultado positivo erróneo. Podríamos aplicar a estos números el teorema de Bayes, un resultado importante de la teoría de la probabilidad, a fin de comprender mejor la cuestión, pero los cálculos aritméticos resultan más ilustrativos y también más divertidos.

Supongamos que un millón de personas son sometidas a las pruebas para detectar ese cáncer. Si la prevalencia es de dos personas por cada 500, alrededor de 4000 personas (1.000.000 × 2/500) padecerán la enfermedad. Según nuestras premisas de partida, un 99,5 por ciento de esas 4000 personas obtendrá un resultado positivo en las pruebas, luego obtendremos 3980 resultados positivos (4000 × 0,995). En cambio, 996.000 de las personas sometidas a la prueba (1.000.000 – 4000) estarán sanas. Ahora bien, según otra de las premisas, un 1 por ciento de esas 996.000 personas sanas también obtendrá un resultado positivo en las pruebas. Es decir, habrá unos 9960 falsos positivos (996.000 × 0,01). Así pues, de los 13.940 resultados positivos (3980 + 9960), solo un 28,6 por ciento (3980/13.940) serán verdaderos positivos.

Si las 9960 personas sanas son sometidas a tratamientos que resultan dañinos para ellas, tales como la cirugía, la quimioterapia o la radioterapia, el beneficio neto de la prueba de detección podría ser absolutamente contraproducente.

Las cifras variarán según el cáncer y la prueba en cuestión, pero ese balance de pros y contras siempre estará inmerso en esa región nebulosa que separa la psicología y las matemáticas. Una vida salvada gracias a una prueba, aunque no sea algo muy frecuente, es un resultado mucho más significativo desde el punto de vista psicológico que los frecuentes y sustanciales perjuicios ocasionados por ella, los cuales, en cierta medida, suelen pasarse por alto.

—John Allen Paulos
Departamento de matemáticas
Universidad Temple
Filadelfia, EE.UU.



MEHAU KULYK, PHOTO RESEARCHERS, INC.



BIOLOGÍA

UN NUEVO CAMINO HACIA LA LONGEVIDAD

Se ha descubierto un mecanismo ancestral que retarda el envejecimiento. Los fármacos con capacidad de modularlo podrían muy bien posponer el cáncer, la diabetes u otras enfermedades propias de la tercera edad

David Stipp

EVAN KAFKA (*fotografía*); NIKKI WANG (*estilismo*)

David Stipp es redactor científico, especializado en gerontología desde finales de los años noventa.



En una clara mañana de noviembre de 1964 el *Cape Scott*, de la Marina Real canadiense, zarpó de Halifax, en Nueva Escocia, para realizar una expedición de cuatro meses. Comandados por Stanley Skoryna, catedrático de la Universidad McGill, el equipo de 38 científicos que iba a bordo partió hacia la isla de Pascua, un territorio volcánico que emerge del océano Pacífico a 3500 kilómetros de la costa de Chile. Se había planeado construir un aeropuerto en la remota isla, famosa por sus misteriosas esculturas de cabezas enormes, y el grupo quería estudiar su gente, flora y fauna, que se mantenían casi aislados de la modernidad.

Los isleños recibieron calurosamente al equipo de Skoryna, que se trajo cientos de especímenes de plantas y animales, así como muestras de sangre y saliva de los 949 residentes. Sin embargo, el mejor hallazgo lo aportó un tubo de ensayo lleno de tierra: contenía una bacteria que sintetizaba un compuesto químico defensivo con una propiedad extraordinaria, la capacidad de prolongar la vida en diversas especies.

En la actualidad, varios equipos han demostrado que la sustancia, denominada rapamicina, hace aumentar la esperanza de vida máxima de ratones de laboratorio. A menudo, algunas afirmaciones poco fiables sobre el retraso del envejecimiento se refieren a datos que indican un incremento en la esperanza media de vida, algo que se puede conseguir mediante antibióticos u otros fármacos que evitan la muerte prematura pero no influyen sobre el envejecimiento. Por el contrario, un aumento de la esperanza de vida *máxima* (que a menudo se calcula como el promedio de la edad alcanzada por el diez por ciento de la población que más años vive) es una característica distintiva de un retraso en el envejecimiento. Ningún otro fármaco ha prolongado de forma tan contundente la esperanza de vida máxima en mamíferos. Por tanto, el éxito cosechado en ratones ha cambiado el panorama de la gerontología, que busca una forma sencilla de aplazar la senectud, no solo para aumentar la longevidad sino para evitar muchas de las enfermedades asociadas a la edad avanzada, desde las cataratas hasta el cáncer.

Durante años, la esperanza por descubrir compuestos que aplazaran la senectud había sufrido altibajos. El optimismo se disparó con la identificación de mutaciones génicas que prolongaban la esperanza de vida máxima en animales y con el descubrimiento del modo en que la restricción calórica ejercía el mismo efecto en numerosas especies. Sin embargo, los progresos, con todo lo que prometían, no dieron con ningún medicamento que pudiese estirar el límite máximo de la vida de un mamífero. Aunque la restricción calórica ejerce ese efecto y, además, retrasa el cáncer, la neurodegeneración, la diabetes y otras enfermedades relacionadas con la edad en ratones, en la mayoría de los casos, someterse a dietas muy rigurosas no constituye una opción viable.

En 2006 parecía que el resveratrol, el famoso compuesto del vino tinto que reproduce algunos de los efectos de la restricción calórica en ratones, permitiría traspasar la frontera de la senectud tras demostrarse que eliminaba los efectos perjudiciales de las dietas ricas en grasa. Pero más tarde se observó que tal sustancia, que se cree actúa sobre ciertas enzimas, las sirtuínas, no lograba prolongar la esperanza de vida máxima de ratones que seguían una dieta normal. El decepcionante panorama se iluminó de nuevo cuando a mediados de 2009 se anunciaron los resultados obtenidos con la rapamicina. Una terna de laboratorios publicaron de forma conjunta que el compuesto prolongaba un 12 por ciento la esperanza de vida máxima de los ratones en tres experimentos paralelos financiados por el Instituto Nacional del Envejecimiento de EE.UU. Y no solo eso, para asombro de los gerontólogos, el fármaco aumentaba en un tercio la supervivencia media de ratones de avanzada edad, en principio demasiado envejecidos como para poder responder al tratamiento.

El estudio de la capacidad de la rapamicina para alargar la vida en mamíferos ha llevado a fijarse en un mecanismo con más de mil millones de años de antigüedad que parece regular el envejecimiento en ratones y otros animales y que también podría hacerlo en los humanos. Sus elementos principales son la proteína TOR (*target of rapamycin*, la diana de la rapamicina) y el gen que la codifica. Hoy en día, la proteína se está investigando en profundidad en los ámbitos de la gerontología y medicina aplicada. Cada vez más estudios realizados en animales y humanos indican que la inhibición de la versión de esta proteína en células de mamíferos (mTOR) reduce el riesgo de padecer las principales dolencias asociadas a la edad, entre ellas el cáncer, las enfermedades de Alzheimer y de Parkinson, la degeneración miocárdica, la diabetes de tipo 2, la osteoporosis y la degeneración macular. El amplio abanico de sus posibles efectos hace pensar que si se descubriesen medicamentos que actuaran sobre mTOR, servirían para ralentizar el proceso de envejecimiento en los humanos, tal y como hace la rapamicina en ratones y otras especies, una posibilidad con profundas repercusiones en la medicina preventiva. (La propia rapamicina, por desgracia, presenta efectos secundarios que hacen descartarla en los ensayos en humanos).

Un pronóstico semejante ya se había realizado para ciertos fármacos que actúan sobre otras moléculas, en particular sobre

EN SÍNTESIS

En 2009 se descubrió un fármaco, la rapamicina, que prolongaba la vida de los ratones al interferir con la actividad de la proteína TOR de mamíferos (mTOR). El hallazgo constituye la prueba más convincente hasta la fecha de que se puede retrasar el envejecimiento de los mamíferos con fármacos.

Ello despertó el interés por descubrir el papel de mTOR en la senectud. El resultado también hizo plantear otra pregunta: ¿Por qué la eliminación del crecimiento y multiplicación celular (uno de los efectos de la inhibición de mTOR) aumenta la esperanza de vida?

La investigación en torno a esa cuestión podría llevar al desarrollo de medicamentos que postergaran o mitigasen las enfermedades asociadas al envejecimiento, como el alzhéimer, el cáncer o la insuficiencia cardíaca, o incluso aumentaran la longevidad humana.

las sirtuínas. ¿Qué tiene de especial entonces mTOR? El descubrimiento de una sustancia que prolonga la esperanza de vida máxima de un mamífero al actuar sobre mTOR significa que la molécula desempeña una papel fundamental en el envejecimiento de los mamíferos. Por tanto, hoy se está más cerca que nunca de hallar formas de poner freno a la senilidad.

¿CÓMO FUNCIONA TOR?

Los efectos de TOR sobre el envejecimiento se descubrieron cuando la expedición de Skoryna entregó sus muestras de suelo a los antiguos Laboratorios Ayerst de Montreal. Desde el decenio de los cuarenta del siglo xx, la industria farmacéutica había identificado varios antibióticos en el suelo, por lo que los laboratorios examinaron las muestras en busca de compuestos antimicrobianos.

En 1972 extrajeron un inhibidor fúngico. Lo denominaron rapamicina (Rapa Nui es el nombre que los nativos dan a la isla de Pascua). En un principio, Ayerst esperaba utilizarlo para tratar las infecciones por levaduras. Pero entonces, los que estudiaban sus propiedades en cultivos celulares y en el sistema inmunitario de animales descubrieron que la sustancia frenaba la proliferación de las células inmunitarias, lo que hizo orientar su desarrollo hacia la prevención del rechazo de órganos trasplantados. En 1999 la rapamicina recibió la aprobación de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. para su uso en pacientes a los que se había trasplantado un riñón. En el decenio de los ochenta se reveló que el fármaco también inhibía el crecimiento tumoral, y desde 2007 se han aprobado dos derivados (temsirolimus de Pfizer y everolimus de Novartis) para el tratamiento de diversos tipos de cáncer.

Para los biólogos, la capacidad de la rapamicina de reducir la proliferación de levaduras y células humanas resultaba fascinante; se pensó que la sustancia debía de inactivar un gen regulador del crecimiento conservado a lo largo de los mil millones de años de evolución que separan las levaduras de los humanos. En 1991, el equipo de Michael N. Hall, de la Universidad de Basilea, identificó la diana ancestral al descubrir que la rapamicina inhibía los efectos de dos genes, *TOR1* y *TOR2*, que dirigen el crecimiento en levaduras. Tres años más tarde, varios investigadores, entre ellos Stuart Schreiber, de la Universidad Harvard, y David Sabatini, hoy en el Instituto Whitehead para la Investigación Biomédica en Cambridge, Massachusetts, aislaron de forma independiente el gen *TOR* de mamíferos. En la actualidad se sabe que numerosas especies de gusanos, insectos y plantas poseen genes *TOR* que controlan el crecimiento celular.

En la década de los noventa se ahondó en el conocimiento de las funciones del gen tanto en las células como en el organismo entero, muchas de las cuales influían en última instancia en el envejecimiento. En concreto, se descubrió que el gen codifica una enzima que interacciona en el citoplasma con otras proteínas para formar un complejo, TORC1, que supervisa numerosas actividades celulares relacionadas con el crecimiento. La rapamicina afecta sobre todo a TORC1. La enzima TOR también forma parte de un segundo complejo, menos conocido, denominado TORC2.

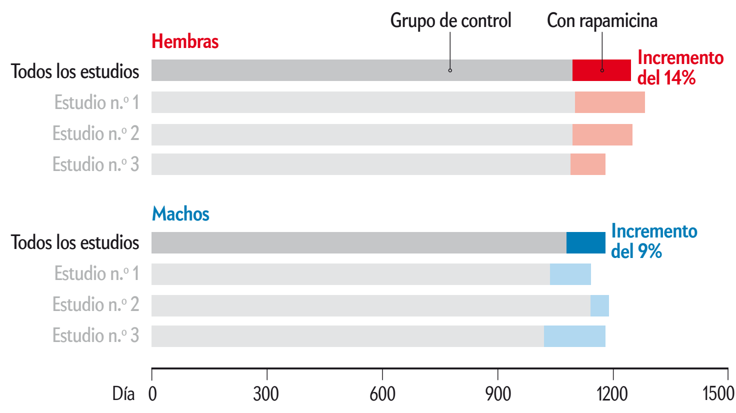
Además, se observó que TOR funcionaba como un sensor del estado nutricional. Cuando hay abundancia de alimento, su actividad aumenta, lo que empuja a las células a producir más proteínas y a dividirse. Pero si la comida escasea, TOR se apacigua y frena la síntesis de proteínas y la división celular, lo que permite economizar recursos. Al mismo tiempo, se intensifica la autofagia, proceso en el que las células degradan sus componentes defectuosos, como proteínas deformes o mitocondrias disfuncionales. Ello genera subproductos aprovechables como combustible o materiales de construcción. Los ratones recién nacidos dependen de la autofagia para obtener energía antes de iniciar la lactancia. Cuando vuelve a haber comida, el equilibrio entre TOR y la autofagia se invierte: la actividad del primero aumenta y la segunda se reduce.

También se descubrió que las rutas de señalización dirigidas por TOR y por la insulina en animales se hallaban interrelacionadas. La insulina, hormona liberada por el páncreas después de una ingesta, advierte al músculo y a otras células que absorban glucosa de la sangre para obtener energía. Pero, además, la insulina es un factor de crecimiento: ella y otras proteínas relacionadas ayudan a acelerar la ruta TOR, un comportamiento que lleva a las células del organismo a crecer y proliferar en respuesta a un aporte de nutrientes. Otra característica importante para la salud reside en la conexión entre la ruta de TOR y la de la insulina, que incluye un bucle de retroinhibición: con la estimulación de TOR las células se vuelven menos sensibles a las señales de la insulina. Por tanto, cuando existe una sobrealimentación crónica, TOR se activa en exceso y las células responden cada vez menos a la insulina; de hecho, esa resistencia a la insulina puede dar lugar a un aumento de la glucosa en sangre y a la diabetes, además de otras enfermedades relacionadas con el envejecimiento, como las cardiopatías.

PUNTO DE INFLEXIÓN

Ratones longevos

En 2009, tres experimentos paralelos en ratones demostraron que un fármaco, la rapamicina, prolongaba la esperanza de vida máxima de los animales entre un 9 y un 14 por ciento. (La esperanza de vida máxima corresponde a la media de edad del 10 por ciento de la población que más tiempo vive). Por primera vez, un fármaco había aumentado de forma notable la longevidad máxima de un mamífero. La proeza generó expectativas de que, algún día, un simple medicamento lograría retrasar el envejecimiento humano y proteger la salud en la tercera edad, aunque los efectos secundarios de la rapamicina tal vez hagan descartar esa sustancia para tal fin.



JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*); FUENTE: «RAPAMYCIN FED LATE IN LIFE EXTENDS LIFESPAN IN GENETICALLY HETEROGENEOUS MICE», POR DAVID E. HARRISON ET AL., EN *NATURE*, VOL. 460, 16 DE JULIO DE 2009

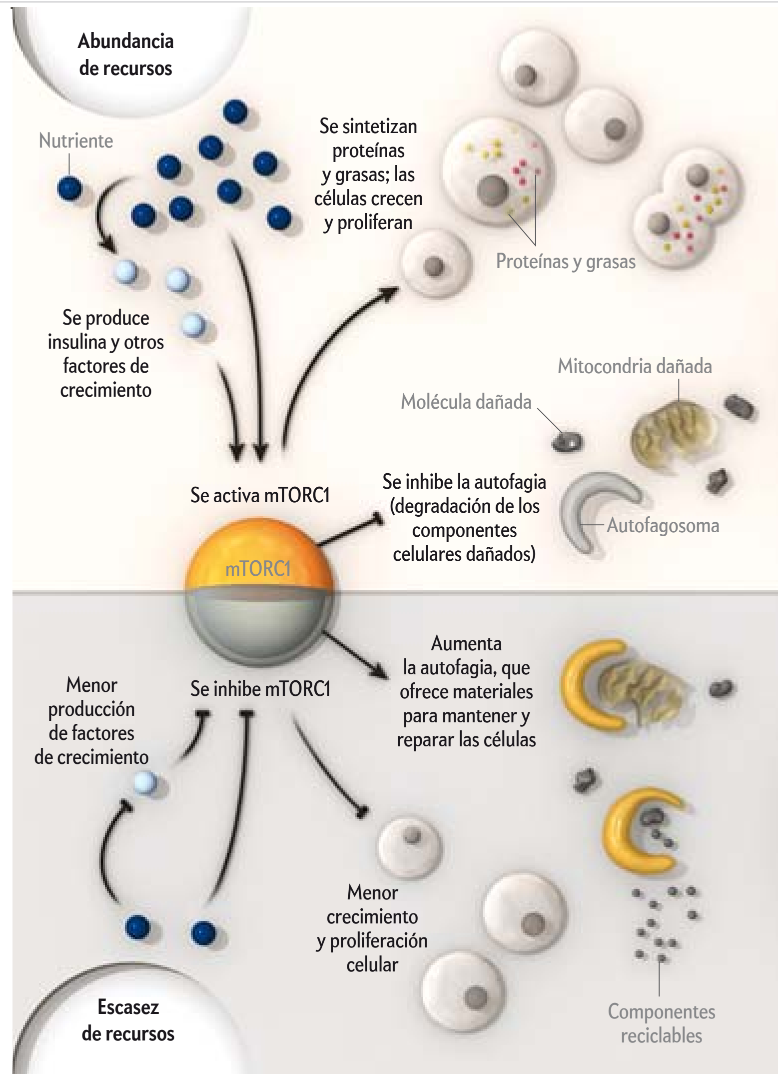
Las dos caras de la molécula TOR

La rapamicina prolonga la vida de levaduras y animales al inhibir la proteína TOR; la restricción calórica también ralentiza el envejecimiento, en parte, al actuar sobre TOR. La investigación sobre la función de la proteína en las células y sobre el modo en que su inhibición alarga la vida indican que TOR posee dos facetas, una positiva y otra negativa. Al principio de la vida constituye un sensor del estado nutricional, un aspecto fundamental durante el crecimiento y desarrollo del organismo (*izquierda*). Sin embargo, después de la madurez, su actividad continuada perjudica las funciones celulares y, por tanto, lesiona los tejidos (*derecha*). Se sospecha que en las personas de edad avanzada los efectos de TOR contribuyen al envejecimiento y a las enfermedades asociadas a él. Se representan aquí las funciones de TOR de mamíferos (mTOR); en las células, mTOR se ve afectado y afecta a un complejo entramado de moléculas. (Las flechas que terminan en punta indican estimulación; las otras, inhibición).

Faceta positiva: Un sensor del estado nutricional en la edad temprana

La proteína TOR de los mamíferos ejerce su efecto junto con otras moléculas, que forman el complejo mTORC1. Si hay abundancia de alimento (*arriba*), se produce más insulina y otras proteínas relacionadas (factores de crecimiento). El complejo reacciona ante la presencia de nutrientes y factores de crecimiento con una mayor síntesis de componentes celulares (especialmente proteínas y grasas) y el crecimiento y división celulares. Al mismo tiempo, da instrucciones a la célula para que disminuya la autofagia, un proceso que degrada las moléculas y mitocondrias (las centrales energéticas de la célula) dañadas.

Cuando el alimento u otros recursos escasean (*abajo*), el complejo mTOR se apacigua y las células se centran en el propio mantenimiento, no en la multiplicación. Mientras tanto, la autofagia aumenta y ofrece materias primas para la reparación celular y la producción de energía.



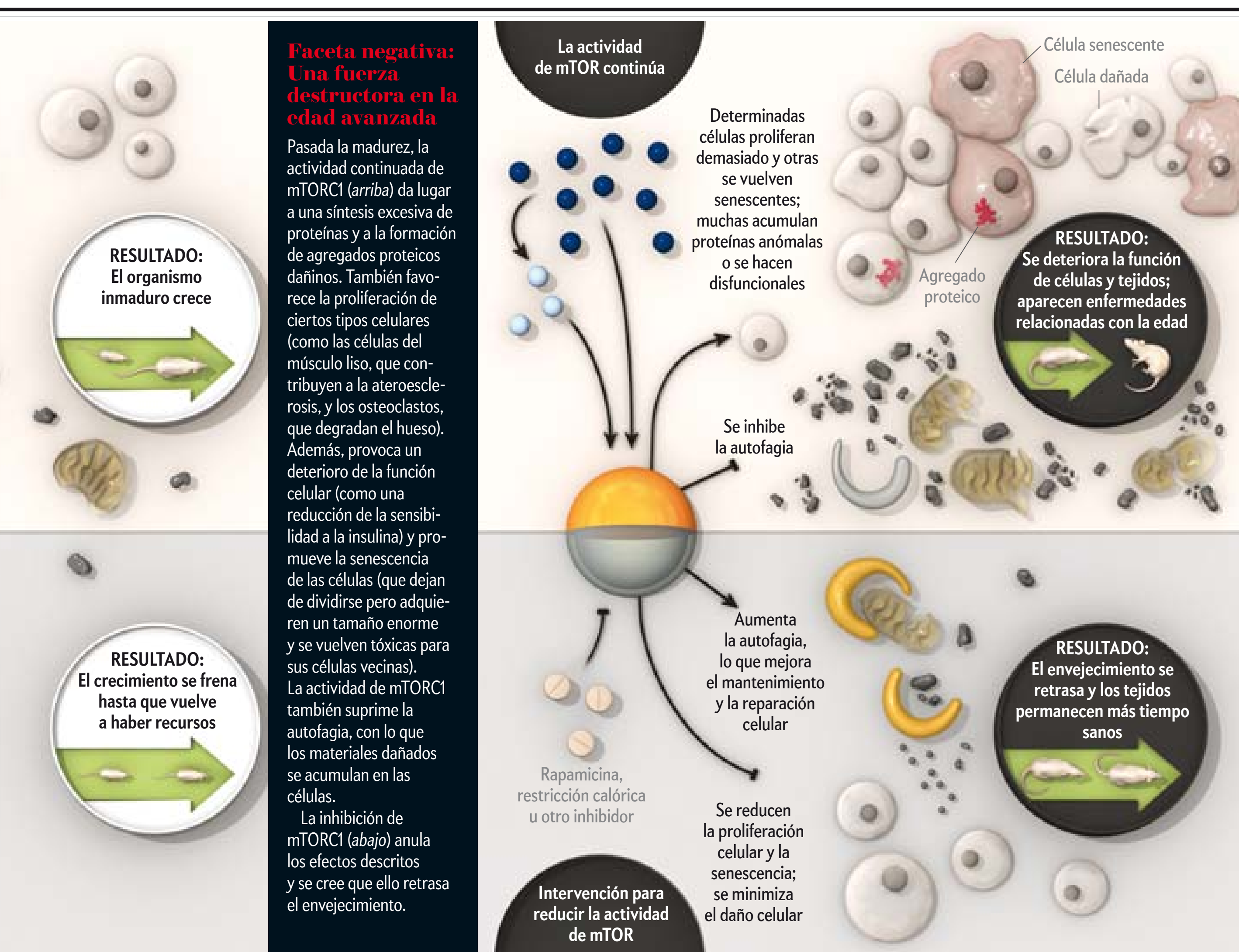
Aparte de reaccionar ante la escasez de nutrientes, TOR también lo hace ante otros tipos de estrés celular, como una baja concentración de oxígeno o lesiones en el ADN. Por regla general, cuando las células se percatan de alguna amenaza para su supervivencia, la actividad de TOR amaina. Debido a la menor producción de proteínas y proliferación celular, se liberan recursos que la célula canaliza hacia la reparación del ADN u otras medidas defensivas. Estudios llevados a cabo en la mosca del vinagre indican que, a medida que la síntesis proteica se va restringiendo durante ese estado de «alerta roja», también se modifica el tipo de proteínas que se fabrican. De modo selectivo, se producen componentes clave de las mitocondrias, lo que quizás ayude a las células a rejuvenecer sus sistemas energéticos. Sin duda, esa respuesta polifacética al estrés debió surgir a lo largo de la evolución para ayudar a las células a luchar contra las condiciones adversas pero, de forma involuntaria, también las ha fortalecido para hacer frente a los estragos del tiempo.

LA RELACIÓN CON LA SENECTUD

La idea de que TOR interviene en el envejecimiento se remonta al decenio de los noventa, cuando se descubrió que las células desprovistas de nutrientes retrasaban su crecimiento mediante la inhibición de TOR. Los gerontólogos habían observado un fenómeno semejante con anterioridad: en 1935, el nutricionista Clive McCay, de la Universidad Cornell, demostró que al ofrecer una dieta deficiente a ratas jóvenes, estas crecían más despacio y vivían mucho más tiempo. Desde entonces, se ha demostrado que la restricción calórica prolonga la esperanza de vida máxima de distintas especies, entre ellas, levaduras, arañas y perros; las pruebas preliminares indican que los simios reaccionan de igual modo. Normalmente, una reducción de un tercio del aporte calórico normal en una edad temprana aumenta la esperanza de vida máxima entre un 30 y 40 por ciento, aparentemente al postergar el deterioro asociado al envejecimiento. En estudios de restricción calórica a largo plazo realizados con macacos Rhesus, los animales ancianos poseen una salud extraordinaria y un aspecto joven para su edad.

La estrategia no siempre funciona (en algunas cepas de ratones de laboratorio acorta la vida), pero cada vez más datos indican que una dieta hipocalórica mejora la salud de las personas de edad avanzada, tal y como sucede en los simios. Por tanto, la identificación de compuestos que imiten los efectos de la restricción calórica sin provocar hambre constituye el santo grial de la gerontología.

A comienzos de la década de 2000, el conocimiento que se tenía sobre la función de TOR hacía sospechar que la supre-



sión de su efecto en las células podría imitar la restricción calórica. En 2003, Tibor Vellai, por aquel entonces en la Universidad de Friburgo (Suiza), en un estudio con nemátodos, demostró que la inhibición genética de la síntesis de TOR contrarrestaba los efectos del envejecimiento y conseguía doblar la duración media de la vida de los gusanos. Un año después, un estudio del Instituto de Tecnología de California dirigido por Pankaj Kapahi reveló que la reducción de la actividad de TOR en moscas del vinagre también alargaba su vida y las protegía de los efectos dañinos de las dietas abundantes. Y en 2005 Brian Kennedy, por aquel entonces en la Universidad de Washington, y sus colaboradores reafirmaron la conexión entre TOR y el envejecimiento al comprobar que la inactivación de varios genes de la ruta TOR en células de levadura aumentaba su longevidad.

Esos y otros estudios sobre TOR despertaron especial interés, porque sugerían que su inhibición no solo imitaba la restricción calórica sino también a los genes mutantes que prolongaban la vida. El primero de esos «gerontogenes» se había descrito una década antes en nemátodos, en los que ciertas mutaciones hacían doblar su esperanza de vida media y de vida máxima; según se demostró más tarde, tales mutaciones interrumpían la señalización de la insulina. Descubrir que el envejecimiento, considerado en el pasado un problema complejo e inabordable, se podía ralentizar de forma espectacular mediante la alteración de un único gen convirtió la gerontología en un asunto candente; entre otras cosas, apuntaba a la posibilidad de retrasar la senectud humana mediante fármacos. Esa idea se vio reforzada por el hallazgo, a finales del decenio de los noventa y principios del dos mil, de varios gerontogenes en ratones que inhibían las señales de crecimiento, como las que llegan a las células a través de la insulina y de otra hormona, el factor de crecimiento 1 parecido a la insulina. En 2003, un ratón con una mutación de ese tipo estableció el récord de longevidad para su especie: casi cinco años (los ratones de laboratorio no suelen vivir más de 30 meses).

Uno podría pensar que las conexiones entre TOR, la restricción calórica y los gerontogenes habrían dado lugar a una acalorada carrera por conocer el modo en que la rapamicina alargaba la vida en mamíferos. Sin embargo, los expertos en el envejecimiento de mamíferos no se tomaron muy en serio el efecto de TOR hasta finales de la década de 2000, afirma Steven Austad, gerontólogo del Instituto Barshop para el Estudio de la Longevidad y el Envejecimiento en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en San Antonio. La razón es que se sabía que la rapamicina era un inmunodepresor, por lo

que casi todo el mundo suponía que su administración a largo plazo resultaría tóxica. No obstante, Zelton Dave Sharp, uno de los colegas de Austad en el Instituto Barshop, llegó a otra conclusión después de examinar la bibliografía relativa a TOR. En 2004 puso en marcha un importante estudio sobre la duración de la vida en ratones tratados a largo plazo con rapamicina.

Financiado por el Instituto Nacional del Envejecimiento, el estudio pareció ir mal al principio; hubo problemas a la hora de formular el medicamento en la comida, que no se pudo administrar hasta que los ratones alcanzaron los 20 meses de vida, el equivalente a 60 años en humanos. En ese punto, afirma Austad, nadie esperaba que funcionase. De hecho, ni siquiera la restricción calórica surte efecto en animales tan viejos. Pero en 2009, tres laboratorios de gerontología que llevaron a cabo el estudio (el de Randy Strong, en el Instituto Barshop, el de David E. Harrison, en el Laboratorio Jackson, y el de Richard A. Miller, en la Universidad de Michigan en Ann Arbor) pasaron a la historia al publicar que el medicamento había aumentado de forma asombrosa la esperanza de vida: un 28 por ciento en los roedores macho y un 38 por ciento en las hembras, en comparación con los animales de control. La esperanza de vida máxima aumentó un 14 por ciento en las hembras y un 9 por ciento en los machos.

A esos resultados extraordinarios les siguieron pronto otros que resaltaban la importancia de TOR en el envejecimiento. Un grupo de la Universidad de Londres publicó que al inactivar *S6K1*, gen que codifica una enzima que interviene en el control de mTOR sobre la síntesis de proteínas, las hembras de ratones se volvían resistentes a las enfermedades asociadas a la edad y aumentaba su esperanza de vida máxima. (Misteriosamente, los machos apenas demostraron ese efecto.) Y los tres laboratorios de EE.UU. que habían ensayado por primera vez la rapamicina en ratones revelaron que, al iniciar las dosis en roedores a los nueve meses de edad, su vida se prolongaba igual que al hacerlo a los 20 meses. Ello sugería que la rapamicina aporta ventajas sobre todo a partir de la mediana edad, tal vez porque actúa en el momento en que se produce el mayor deterioro.

El hecho de que la inhibición de TOR dilate la vida de diversas especies arroja nueva luz sobre los enigmas moleculares del envejecimiento. Sin embargo, el papel destacado de TOR no significa que no haya otras rutas relacionadas con la senectud. De hecho, los gerontólogos están cada vez más convencidos de que las rutas afectadas por la restricción calórica pertenecen a un complejo entramado con numerosas ramificaciones que se puede modular de diversas maneras para promover un envejecimiento saludable. De ese entramado forman parte enzimas relacionadas con la insulina y las proteínas FoxOs, que activan las respuestas de las células ante el estrés. Un número considerable de datos también indican que las sirtuínas contribuyen a los beneficios de la restricción calórica en los mamíferos y, en determinadas circunstancias, participan en la inhibición de TOR. Sin embargo, parece que TOR representaría la unidad central de esa red, al integrar diversas señales para controlar la velocidad de envejecimiento, al menos en varias especies animales y, quizá también, en los humanos.

SE DESVELA UN ENIGMA

El estudio del modo en que la inhibición de TOR y la restricción calórica extienden la vida de numerosas especies ha hecho plantear desde hace tiempo una pregunta: ¿Por qué la evolución ha dado lugar a un mecanismo que retrasa el envejecimiento?



El asunto ha traído de cabeza a los biólogos evolutivos, porque la selección natural actúa para fomentar una reproducción exitosa, no para alargar la vida y mantener la vitalidad a una edad en la que la mayoría de los individuos de una especie han sido eliminados por depredadores, infecciones, accidentes u otras causas. Para contrarrestar esos riesgos extrínsecos, la evolución equipa a los animales para que vivan lo suficiente y se reproduzcan antes de que el entorno los suprima; pero con el tiempo, a medida que la probabilidad de sobrevivir va disminuyendo, se van deteriorando de modo parecido a una casa abandonada. Sin embargo, la restricción calórica retrasa la senilidad en especies muy diferentes, lo que hace pensar que desencadena un mecanismo antiguo, moldeado por la selección natural, que retrasa el envejecimiento bajo determinadas circunstancias.

Una explicación citada con frecuencia sostiene que la restricción calórica debió originar una respuesta para poner freno al envejecimiento durante los tiempos de ayuno, de modo que pudieran sobrevivir y reproducirse cuando las condiciones mejoraran. Los escépticos como Austad, del Instituto Barshop, replican que no hay pruebas de que las dietas hipocalóricas alarguen la vida de los animales en libertad, y que tal efecto solo se ha observado en animales de laboratorio bien cuidados. Los animales salvajes hambrientos y debilitados no suelen vivir lo bastante como para beneficiarse de los genes que demoran el envejecimiento, ni tampoco transmitirlos a la descendencia, por lo que resulta difícil que la evolución haya generado una respuesta ante la inanición.

Algunos gerontólogos proponen otra solución al enigma: la restricción calórica prolonga la vida como efecto secundario de varias reacciones que evolucionaron con un propósito distinto al envejecimiento. Austad defiende la idea de que durante los tiempos de escasez los animales en libertad se dispersan e ingieren alimentos extraños, con lo que se exponen a sustancias tóxicas ajenas a su dieta habitual. La selección natural habría favorecido un sistema de defensa contra los compuestos dañinos, con la activación de una respuesta celular contra el estrés y otros procesos de reparación, lo que habría llevado, de forma involuntaria, a retrasar el envejecimiento.

Hace unos años, Mikhail V. Blagosklonny, del Instituto Oncológico Roswell Park en Búfalo (Nueva York), aprovechó los descubrimientos sobre TOR para proponer otra teoría que interpreta el efecto beneficioso de la restricción calórica como una especie de accidente. Según él, la capacidad de crecimiento, considerada la esencia de la juventud, nos conduce a la tumba a una edad avanzada. La alimentación deficiente en las últimas etapas de la vida aumenta la longevidad al contrarrestar los

EVAN KAFKA

efectos adversos de las rutas de crecimiento, entre las que destaca la ruta de TOR.

Blagosklonny sostiene que TOR, esencial en el desarrollo y la reproducción, se convierte en el motor del envejecimiento una vez que se ha alcanzado la madurez. Como promotor del crecimiento, TOR favorece la proliferación de las células del músculo liso en las arterias (un paso clave en la ateroesclerosis), la acumulación de grasa (que contribuye a la inflamación generalizada del organismo), la aparición de resistencia a la insulina, la multiplicación de los osteoclastos (células que descomponen los huesos) y el crecimiento de tumores. Además, al disminuir la autofagia, TOR promueve la acumulación de proteínas que tienden a agregarse y de mitocondrias disfuncionales que generan gran cantidad de radicales libres. Estos últimos dañan al ADN y perjudican el metabolismo energético de la célula. En las neuronas, contribuye al aumento de proteínas resistentes a la degradación, un proceso que interviene en la enfermedad de Alzheimer y otras formas de neurodegeneración. Blagosklonny ha demostrado que, al avanzar la edad, las señales de TOR también ayudan a desencadenar la senescencia, un estado que provoca daños en las células vecinas y menoscaba la capacidad regenerativa de los tejidos.

El investigador concluye que la evolución no ha construido un mecanismo diseñado para ralentizar el envejecimiento. En vez de ello, los efectos sobre la longevidad de la rapamicina, la restricción calórica y las mutaciones que anulan las hormonas de crecimiento representan simples accidentes de la naturaleza. Estos interfieren con el «crecimiento alterado» asociado a la senilidad, y esta avanza más despacio de lo normal. De hecho, la ruta de TOR se comporta en gran medida como un programa de envejecimiento a pesar de que se originó para ayudar en las etapas tempranas del desarrollo.

Aunque la teoría de Blagosklonny resulta novedosa, se inspiró en una hipótesis bastante aceptada propuesta en 1957 por el biólogo evolutivo George Williams. Este proponía que el envejecimiento está provocado por genes de doble filo, beneficiosos en las etapas iniciales de la vida pero perjudiciales hacia el final de la misma. Según Williams, esos «genes pleiotrópicos antagonistas» se ven promovidos por la evolución porque, siempre que surge un conflicto de intereses, la selección natural favorece la juventud frente a la vejez. Blagosklonny considera *TOR* el ejemplo más paradigmático de ese tipo de genes.

Al igual que muchas teorías nuevas, la de Blagosklonny genera controversia. Según algunos, pone demasiado énfasis en TOR. Otros consideran que la clave reside en los aspectos de TOR no promotores del crecimiento; creen que la inhibición por TOR de la autofagia, que renueva los componentes celulares, influye de manera notable sobre el envejecimiento. Aun así, muchos expertos en TOR opinan que la teoría es verosímil, y Michael N. Hall, de la Universidad de Basilea, reconoce el mérito de Blagosklonny al «conectar puntos que otros ni siquiera llegan a ver».

TOR Y LA MEDICINA DEL FUTURO

Si TOR induce de forma decisiva el envejecimiento, ¿qué opciones hay para inutilizarlo? Los efectos secundarios de la rapamicina tal vez hagan descartar su uso en los humanos, ya que puede incrementar los niveles de colesterol en sangre, provocar anemia y retrasar la curación de heridas, además de otras alteraciones.

Otro fármaco, la metmorfina, podría representar una alternativa, aunque harían falta numerosos ensayos para confirmarlo. La metmorfina es el tratamiento más prescrito contra la diabetes; millones de personas lo toman para reducir la concentración de glucosa en sangre. Su mecanismo de acción no se conoce bien, pero se sabe que inhibe la ruta de TOR y activa otra enzima relacionada con el envejecimiento, AMPK, que también resulta estimulada por la restricción calórica y promueve la respuesta contra el estrés en las células. Además, se ha demostrado que la metmorfina emula el efecto de la restricción calórica sobre la actividad génica en ratones, y ciertas pruebas indican que podría aumentar la esperanza de vida máxima en los roedores. Todavía faltan años para saber si la metmorfina reproduce los efectos de una dieta hipocalórica en los humanos, aunque se están llevando a cabo estudios para determinar si alarga la vida en los múridos.

Lograr un aumento de la longevidad humana proporcional al que provoca la rapamicina en los ratones supondría añadir una media de entre cinco y diez años a la vida de un humano. El efecto sería extraordinario. De hecho, la esperanza de vida en el mundo desarrollado se ha elevado tanto durante el pasado siglo que, en lo referente al envejecimiento, parecemos atletas olímpicos que tratan de conseguir mejoras cada vez más pequeñas: en EE.UU., la esperanza media de vida aumentó en más de un 50 por ciento durante el siglo xx, mientras que en el último decenio lo hizo menos de un 2 por ciento.

Como hemos reducido al máximo la mortalidad durante las primeras etapas de la vida, ampliar aún más la esperanza de vida significará luchar contra las enfermedades asociadas a la edad. El hecho de que se hayan disparado los costes de la medicina geriátrica sugiere que se trata de un reto formidable. Sin embargo, los fármacos capaces de retrasar el envejecimiento podrían conseguirlo. Podrían utilizarse como medicinas preventivas para posponer las enfermedades habituales de la senectud (demencia, osteoporosis, cataratas, cáncer, pérdida de masa y fuerza muscular, sordera, incluso las arrugas), del mismo modo que hoy los medicamentos que reducen la presión arterial y el colesterol disminuyen el número de ataques cardíacos en las personas de mediana edad. Nos proporcionarían un tiempo de buena calidad y prolongarían nuestro periodo de vitalidad antes de empezar a debilitarnos y morir.

El desarrollo de este tipo de medicamentos no resultará fácil. Uno de los obstáculos se debe a la falta de una forma fiable de medir la velocidad del envejecimiento humano; una buena vara de medir permitiría analizar la eficacia sin tener que llevar a cabo ensayos clínicos excesivamente largos. Sin embargo, el descubrimiento de fármacos contra el envejecimiento valdrá la pena, aunque solo sea para promover una vejez saludable, con independencia de si se aumenta la longevidad. ¿Quién iba a pensar que un vial lleno de tierra recogido hace casi cinco décadas se iba a convertir en un campo de investigación tan fértil que podría llevarnos a conseguir más años de calidad de vida?

PARA SABER MÁS

TOR signaling in growth and metabolism. Stephan Wullschleger et al. en *Cell*, vol. 124, n.º 3, págs. 471-484, 10 de febrero de 2006. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16469695**

Growth and aging: A common molecular mechanism. Mikhail V. Blagosklonny y Michael N. Hall en *Aging*, vol. 1, n.º 4, págs. 357-362, 20 de abril de 2009. **www.ncbi.nlm.nih. gov/pubmed/20157523**

Rapamycin fed late in life extends lifespan in genetically heterogeneous mice. David E. Harrison et al. en *Nature*, vol. 460, págs. 392-395, 16 de julio de 2009.

The youth pill: Scientists at the brink of an anti-aging revolution. David Stipp. Penguin Books, Londres, 2010.

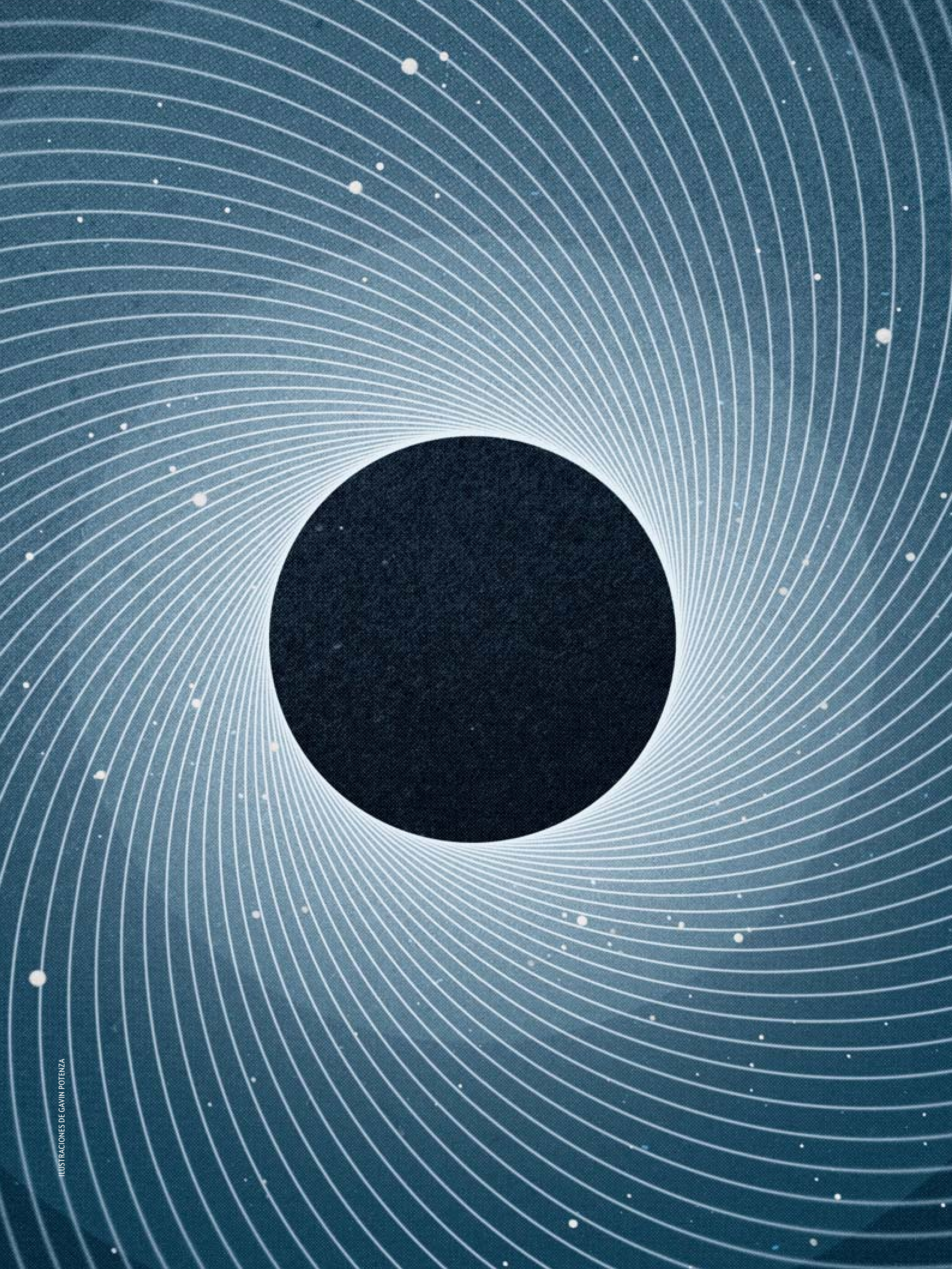
Aging and TOR: Interwoven in the fabric of life. Zelton Dave Sharp en *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 68, n.º 4, págs. 587-597, febrero de 2011. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20960025**

COSMOLOGÍA

AGUJEROS NEGROS DE MASA INTERMEDIA

Los agujeros negros con una masa inferior a un millón de veces la del Sol podrían resultar clave para entender cómo se formaron sus hermanos supermasivos y las galaxias que los albergan

Jenny E. Greene



ILUSTRACIONES DE GAVIN POTENZA

Jenny E. Greene fue pionera en el estudio de los agujeros negros de tamaño intermedio, un tema que formó parte de su tesis doctoral, en Harvard. Actualmente es profesora en la Universidad de Princeton, donde investiga la evolución de las estructuras galácticas.



DESDE HACE UNOS DIEZ AÑOS, SABEMOS QUE CASI todas las galaxias de gran tamaño albergan un inmenso agujero negro; un objeto cuya atracción gravitatoria exhibe una intensidad tal que ni siquiera la luz puede escapar. Al morir, algunas estrellas pueden convertirse en agujeros negros con masas de entre tres y cien veces la del Sol. Sin embargo, tales objetos resultan minúsculos en comparación con los descomunales titanes de miles de millones de masas solares que habitan los núcleos galácticos.

Los agujeros negros supermasivos plantean grandes interrogantes. ¿Por qué tantas galaxias poseen uno? ¿Qué fue primero, la galaxia o el agujero negro? ¿Cómo se formaron? El misterio se intensifica si tenemos en cuenta que los agujeros negros supermasivos ya poblaban el universo cuando este era muy joven. De hecho, en junio de 2011 se publicó el descubrimiento del ejemplo más antiguo conocido hasta la fecha: un agujero negro de 2000 millones de masas solares que ya existía hace unos 13.000 millones de años, apenas 770 millones de años después de la gran explosión. ¿Cómo es posible que un agujero negro alcanzase un tamaño semejante en tan poco tiempo?

Un proceso de formación tan rápido deja perplejos a los expertos porque, a pesar de su fama como potentes aspiradores, los agujeros negros actúan a modo de un ventilador. El gas que cae hacia el agujero negro acaba arremolinándose a su alrededor y forma un inmenso disco de acreción, el cual se calienta y emite radiación, sobre todo a medida que el gas se aproxima a la zona de no retorno. Dicha radiación barre parte del gas hacia fuera, lo que limita la tasa de crecimiento del objeto. Los cálculos indican que un agujero negro que absorba materia a la máxima velocidad posible duplicaría su masa cada 50 millones de años. Ese ritmo resulta demasiado lento como para que un remanente estelar se convierta en un monstruo de 1000 millones de masas solares en menos de 1000 millones de años.

A grandes rasgos, existen dos teorías para explicar el origen de los agujeros negros supermasivos. La primera, considerada durante muchos años, supone que los primeros agujeros negros nacieron, en efecto, a partir de remanentes estelares. Las primeras estrellas que se formaron en el universo probablemente fueron mucho mayores que las que vinieron después, ya que las nubes de gas primordial carecían de los elementos químicos que contribuyen al enfriamiento del gas y, con ello, a su fragmentación en nubes menores. Estos colosos estelares habrían consumido todo su combustible con rapidez y se habrían convertido en agujeros negros de tal vez cien veces la masa del Sol. Después, algún proceso de acreción más rápido que el ordinario habría acelerado su crecimiento. Si uno de estos objetos se formase en el interior de un cúmulo estelar denso, podría fusionarse con otras estrellas y agujeros negros y alcanzar unas 10.000 masas solares a una velocidad mucho mayor que la habitual. El desarrollo posterior podría explicarse por medio de los procesos de acreción ordinarios, a los que quizá cupiese añadir la fusión con algún que otro agujero negro.

Sin embargo, el descubrimiento de que los agujeros negros supermasivos ya poblaban el cosmos en épocas tan tempranas obligó a replantearse la viabilidad de los mecanismos propuestos para explicar el crecimiento acelerado. Los expertos comenzaron a preguntarse qué otros procesos podrían desembocar en la creación de agujeros negros; en particular, qué mecanismos podrían dar lugar a «semillas» mayores que las que aparecen tras la muerte de una estrella.

Se propuso una segunda teoría, basada en modelos que originaban grandes agujeros negros sin necesidad de pasar por una fase estelar intermedia. En su lugar, una nube de gas lo suficientemente grande colapsaría y se convertiría en un agujero negro mucho mayor que el producido por cualquier estrella. Este mecanismo permitiría que el objeto alcanzase las 10.000 o incluso las 100.000 masas solares con rapidez, lo que aliviaría en cierta medida el problema de la formación de agujeros negros supermasivos en un universo muy joven. El proceso de colapso directo no se observa hoy en día, pero las condiciones del cosmos primitivo eran bien distintas de las actuales.

Por desgracia, no resulta fácil decidir entre el modelo de colapso estelar y el basado en la implosión de gigantescas nubes de gas. Por más que podamos escudriñar el pasado apuntando nuestros telescopios hacia lugares muy distantes, las semillas de los agujeros negros supermasivos se encuentran hoy demasiado lejos como para poder observarlas de manera directa. El

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros mil millones de veces más masivos que el Sol ya existían cuando el universo era muy joven. ¿Cómo pudieron formarse con tal rapidez? ¿Qué proceso originó los agujeros negros «semilla» a partir de los cuales crecieron?

Quizá esas semillas se formasen a partir de la fusión de agujeros negros menores, procedentes de remanentes estelares. Otras teorías propugnan el colapso de nubes gigantescas de gas primordial, sin una fase estelar intermedia.

Para resolver la cuestión, los astrónomos buscan agujeros negros de tamaño intermedio: progenitores potenciales que no habrían alcanzado el estado supermasivo. Su estudio parece sugerir que se habrían formado por colapso directo de nubes de gas.

futuro telescopio espacial James Webb acaso podría revelarlas, pero su lanzamiento, no previsto antes de 2018, se ve amenazado por problemas de financiación. Así las cosas, mis colaboradores y yo decidimos adoptar otra estrategia: buscar semillas que, por una razón u otra, hubiesen sobrevivido hasta nuestros días sin convertirse en agujeros negros supermasivos.

Si los progenitores de los agujeros negros supermasivos procediesen del colapso estelar, deberíamos encontrar un gran número de semillas tanto en el centro como en la parte externa de las galaxias, pues las estrellas que las originaron podrían haber muerto en cualquier lugar. También cabría esperar un abanico continuo de masas entre 100 y 100.000 veces la del Sol, ya que su crecimiento podría haberse interrumpido por inanición en cualquier momento hacia el estado supermasivo. En cambio, si se hubieran formado mediante el colapso directo de nubes de gas, sus restos escasearían, pues tales procesos habrían ocurrido con mucha menos frecuencia que la muerte estelar. Y en lugar de un amplio intervalo de masas, la mayoría de las semillas supervivientes rondaría las 100.000 masas solares, el valor que los modelos teóricos arrojan como más probable.

Así pues, algunos investigadores hemos estado rastreando el cielo en busca de un nuevo tipo de agujero negro, ni de masa estelar ni supermasivo, al que hemos bautizado como «peso medio». Nuestro objetivo consiste en descubrir si la abundancia y las masas observadas se ajustan mejor al modelo de colapso estelar o al gaseoso. Cuando nos embarcamos en la empresa, hace ahora alrededor de una década, la aventura no se antojaba muy prometedora; tan solo se conocía un agujero negro de masa intermedia, y la mayoría lo consideraba una casualidad sin importancia. Desde entonces, sin embargo, hemos detectado centenares de ellos.

¿Qué agujeros negros pertenecen a la categoría de los pesos medios? En este artículo consideraremos como tales aquellos con masas comprendidas entre mil y dos millones de veces la del Sol. El límite superior resulta un tanto arbitrario, pero excluye los objetos supermasivos más pequeños conocidos, como el agujero de cuatro millones de masas solares que ocupa el centro de la Vía Láctea. La frontera es necesariamente difusa, ya que, entre otras razones, las estimaciones de la masa de un agujero negro sufren una gran imprecisión. Hace unos años, por ejemplo, algunas mejoras en la técnica de medida nos obligaron a corregir al alza, en un factor dos, las masas de nuestro primer muestreo de pesos medios. En cualquier caso, el límite exacto se torna irrelevante siempre y cuando centremos nuestra atención en los agujeros negros que no alcanzan la categoría de supermasivos. Lo que hemos aprendido hasta ahora nos está abriendo una nueva perspectiva sobre la interacción entre los agujeros negros y las galaxias en las que habitan.

PESOS MEDIOS ESQUIVOS

Un agujero negro puede delatar su presencia de diversas maneras. Las estrellas que se agitan a gran velocidad en las órbitas más cercanas al centro galáctico constituyen un claro indicador de la presencia de un agujero negro supermasivo. Sin embargo, los de masa intermedia no ejercen una atracción gravitatoria lo bastante intensa como para manifestarse de esa manera. Por ello, nuestro método se basa en la búsqueda de agujeros negros activos, aquellos que se encuentran engullendo materia, ya que cuando esta cae y se calienta, emite una ingente cantidad de luz.

Tras décadas de estudios, los astrónomos habían llegado a la conclusión de que los agujeros negros activos residían en un tipo muy concreto de galaxias. En general, las galaxias de ma-

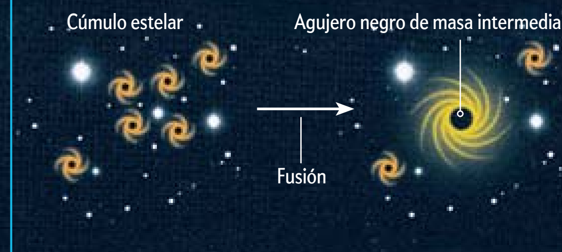
LA PREGUNTA PRINCIPAL

¿Cuál es el origen de los agujeros negros supermasivos?

Los agujeros negros supermasivos, de miles de millones de masas solares, ya existían pocos cientos de años después de la gran explosión. Sin embargo, los procesos habituales no permiten que un remanente estelar (*naranja*) se convierta en un agujero negro supermasivo (*azul*) en un tiempo tan breve. Por tanto, estos debieron crecer a partir de agujeros negros «semilla» (*amarillo*) mucho mayores que una estrella. Pero ¿cómo se formaron esos agujeros negros de tamaño intermedio?



Según la teoría tradicional, un agujero negro de masa estelar podría alcanzar con rapidez las 10.000 masas solares si engullese otras estrellas y se fusionase con otros agujeros negros. Después crecería al ritmo habitual, absorbiendo gas, hasta convertirse en un agujero negro supermasivo.



Otros modelos proponen el colapso gravitatorio de una nube gigantesca de gas primordial. El proceso podría originar un agujero negro de masa intermedia directamente, sin pasar por la fase estelar.



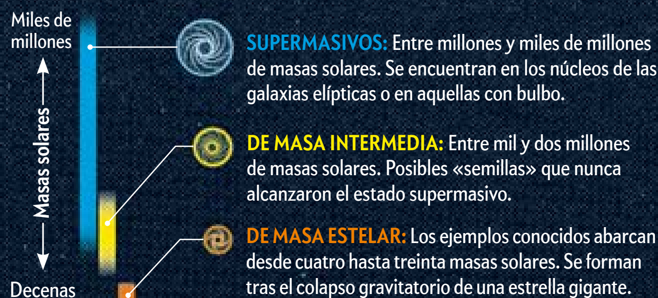
La búsqueda de agujeros negros de masa intermedia pretende determinar cuál de los dos procesos tuvo lugar.

Agujeros negros y galaxias hospedadoras

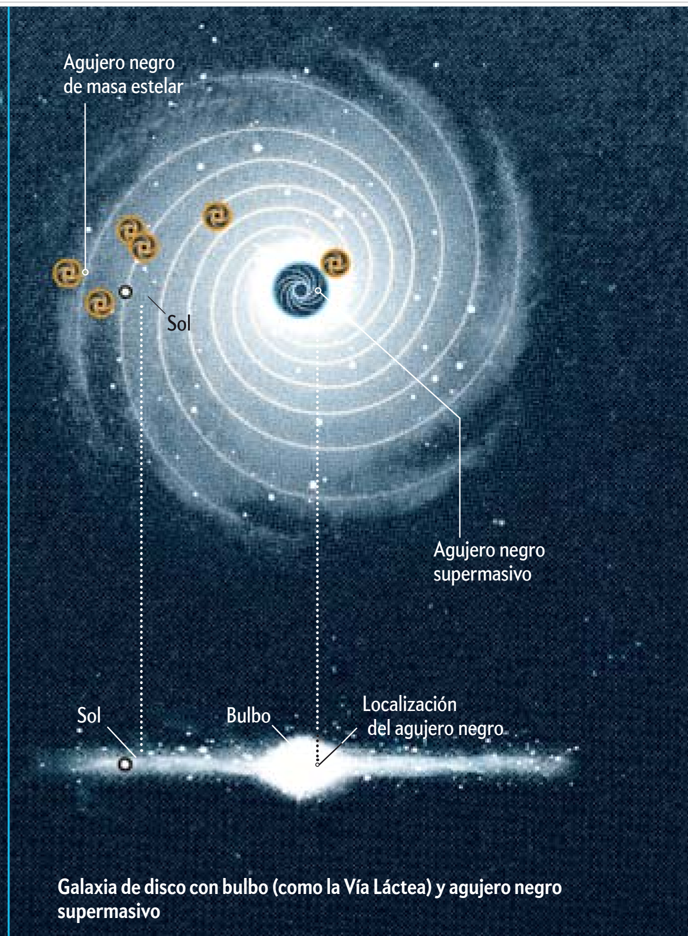
Existen varias clases de galaxias, algunas de las cuales suelen albergar agujeros negros supermasivos. La Vía Láctea (*izquierda*) es una galaxia espiral, con forma de disco y un bulbo central (una gran bola de estrellas, muy densa). Este alberga un agujero negro supermasivo de 4 millones de masas solares (*azul*). También se han detectado agujeros negros de masa estelar (*naranja*). Todas las galaxias con bulbo y las grandes galaxias elípticas (*centro*) parecen acoger un agujero negro supermasivo en su centro. En cambio, los de tamaño intermedio (*amarillo, a la derecha*) suelen encontrarse en las galaxias discoidales sin bulbo. Los agujeros negros de masa estelar son comunes a todas ellas.

Clases de agujeros negros

Los agujeros negros conocidos se clasifican en tres tipos, de acuerdo con su masa:



Los agujeros negros no están representados a escala



Galaxia de disco con bulbo (como la Vía Láctea) y agujero negro supermasivo

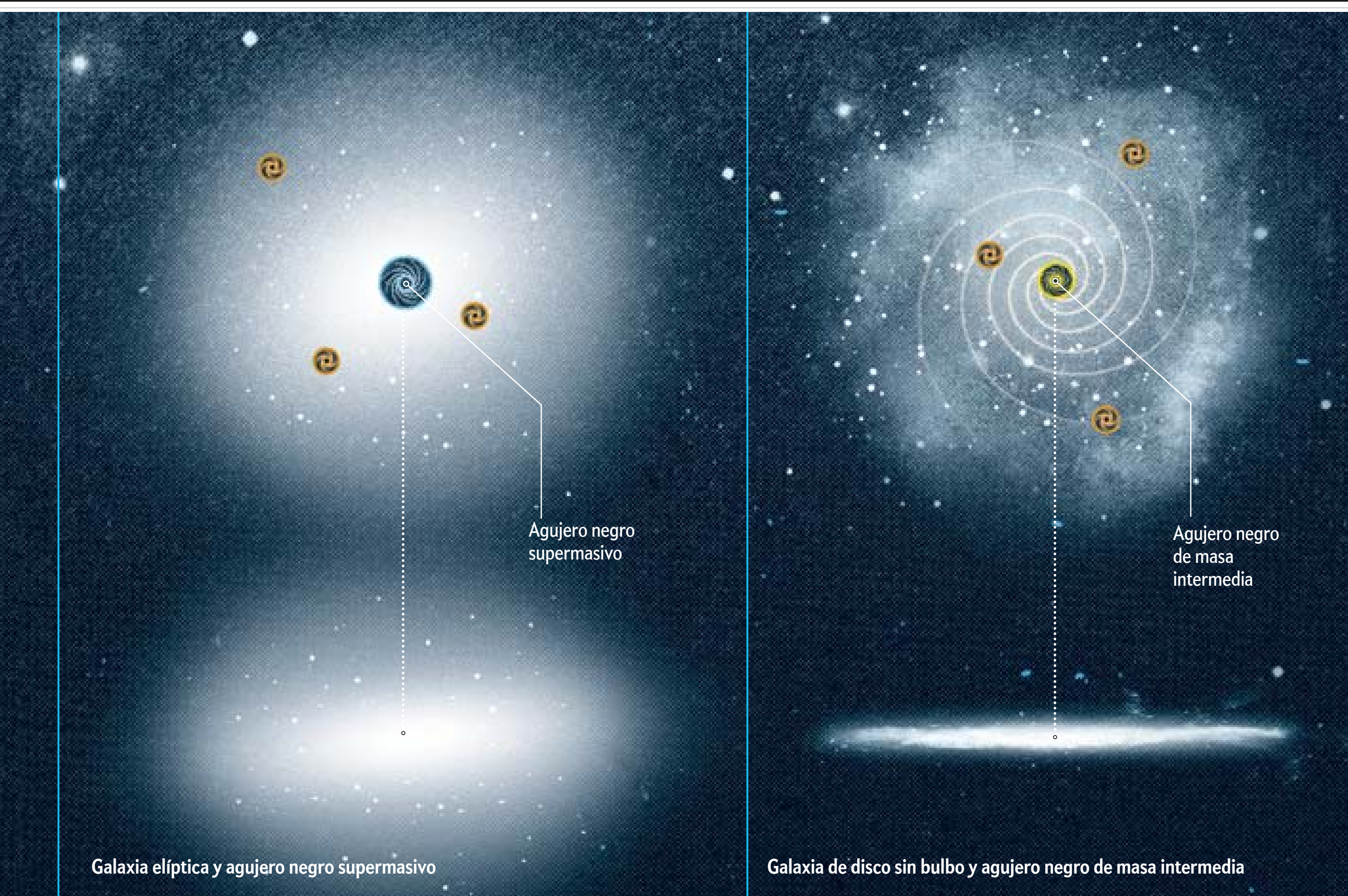
yor tamaño pueden clasificarse en dos grandes grupos: algunas, como la nuestra, poseen un gran disco de estrellas en rotación; otras, las galaxias elípticas, adoptan el aspecto de una gran bola de estrellas. Numerosas galaxias discoidales incluyen también un bulbo, una región central que se asemeja a una pequeña galaxia elíptica. Los agujeros negros activos se hallan, sobre todo, en grandes galaxias elípticas o en galaxias de disco con bulbos prominentes. Casi todos los bulbos galácticos situados lo bastante cerca de nosotros como para poder examinarlos han resultado contener un agujero negro de entre millones y miles de millones de masas solares. Por lo general, la masa del agujero negro suele ascender al uno por mil de la masa del bulbo. Esta sorprendente correlación plantea no pocos interrogantes, pues sugiere que las galaxias y los agujeros negros supermasivos habrían evolucionado a la par, algo para lo que carecemos de explicación satisfactoria. A efectos prácticos, sin embargo, este patrón nos indica dónde buscar los pesos medios: en las galaxias con los bulbos de menor tamaño.

Una pequeña galaxia muy intrigante nos sugirió una idea. Mi director de tesis, Luis C. Ho, del Observatorio Carnegie, estudió para su propia investigación doctoral, en 1995, 500 de las galaxias brillantes más cercanas. Halló que la mayoría de las que poseían grandes bulbos contenían un agujero negro activo, pero no así las carentes de bulbo... con una interesante excepción: NGC 4395, una galaxia sin bulbo, pero que poseía un agujero negro activo. Los directores de tesis de Ho ya habían advertido esta excentricidad en 1989, pero la mayoría lo tomó por una anomalía sin interés. A excepción de NGC 4395, el estudio de Ho no hizo sino confirmar la regla general, según la cual las galaxias sin bulbo carecen de agujero negro.

Medir con precisión la masa del agujero negro de NGC 4395 plantea todo un reto. En astronomía, las estimaciones más directas de la masa de un objeto se basan en los movimientos orbitales de los cuerpos circundantes. Del mismo modo que la velocidad de un planeta y el diámetro de su órbita permiten calcular la masa del Sol, las órbitas de las estrellas en una galaxia pueden revelar la masa del agujero negro central. Pero, para ello, su masa debe ser lo suficientemente elevada como para generar efectos que nuestros instrumentos puedan detectar. El agujero negro de NGC 4395, sin embargo, resulta demasiado pequeño.

Ante tales casos hemos de recurrir a indicios menos directos. Uno de ellos se basa en la intensidad de los rayos X emitidos por el disco de acreción del agujero negro. En general, esta varía con el tiempo y, cuanto mayor es el agujero negro, más lentos se muestran dichos cambios. En 2003, David C. Shih, por entonces en la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores constataron que la intensidad de los rayos X procedentes de NGC 4395 variaba con tal rapidez que su agujero negro debía poseer entre 10.000 y 100.000 masas solares. Ese mismo año, Ho dedujo un abanico de masas similar a partir de otro tipo de pruebas.

Una medición algo más directa fue realizada en 2005 por Bradley M. Peterson, de la Universidad estatal de Ohio, y sus colaboradores. Para ello, utilizaron el telescopio espacial Hubble y una técnica denominada mapas de reverberación, en la



Galaxia elíptica y agujero negro supermasivo

Galaxia de disco sin bulbo y agujero negro de masa intermedia

que las nubes de gas que se arremolinan en torno al agujero negro desempeñan un papel análogo al de los planetas alrededor del Sol. En este caso, es el desfase temporal de los ecos de luz procedentes de las nubes lo que determina el radio de sus órbitas. Peterson y su equipo concluyeron que la masa del agujero negro de NGC 4395 ascendería a unas 360.000 masas solares, si bien este resultado sufre una gran incertidumbre que podría llegar a alterar su valor en un factor tres, debido a las múltiples suposiciones que deben efectuarse en el proceso de cálculo.

La galaxia sin bulbo NGC 4395 parecía albergar justo el tipo de agujero negro de masa intermedia que estábamos buscando. Aun así, de las 500 galaxias examinadas por Ho, esta era la única sin bulbo que mostraba signos inequívocos de la presencia de un agujero negro activo. La segunda apareció en 2002: Aaron J. Barth, por entonces en el Instituto de Tecnología de California, empleó el telescopio Keck II, en Hawái, para obtener un espectro de POX 52, una galaxia muy peculiar pero poco estudiada. Al igual que NGC 4395, esta mostraba indicios de poseer un agujero activo, a pesar de no contarse entre los sospechosos habituales ya que se trataba de una galaxia esferoidal, distinta de las elípticas y las discoidales con bulbo.

Barth envió el nuevo espectro de POX 52 a Ho. Al recibirlo, este le preguntó cómo había obtenido un espectro tan hermoso de NGC 4395: los resultados mostraban tantas semejanzas que Ho no lograba distinguirlos. Son justamente los rasgos característicos de este tipo de espectros los que revelan la presencia de un agujero negro.

Dado que POX 52 se halla a 300 millones de años luz, unas veinte veces más lejos que NGC 4395, las estimaciones de la masa de su agujero negro resultan, por fuerza, más indirectas. A pesar de ello, varias investigaciones independientes apuntaban a un agujero negro de unas 100.000 masas solares. Con POX 52, la familia de galaxias sin bulbo y con un agujero negro de peso medio pasó a tener dos miembros.

Sin embargo, aún debíamos hallar más objetos de tamaño intermedio para poder afrontar algunas cuestiones básicas: ¿Cuán abundantes son los pesos medios? ¿Poseen uno todas las galaxias sin bulbo, o la mayoría carecen de él? ¿Existen en otros lugares? ¿Los hay de menor tamaño que los de NGC 4395 y POX 52? Solo respondiendo a estas preguntas podremos averiguar cuál fue el proceso de formación de las semillas de los agujeros negros supermasivos y qué papel desempeñaron en el universo primitivo.

¿ABUNDAN LOS PESOS MEDIOS?

Por desgracia, las técnicas habituales no se muestran demasiado efectivas a la hora de buscar agujeros negros activos de masa intermedia. Cuanto mayor es un agujero negro, más masa absorbe y más luz emite esta. Los de menor tamaño, en cambio, no resultan tan fáciles de detectar. Pero la situación se plantea mucho peor. Las galaxias elípticas, donde suelen residir los agujeros negros de mayor tamaño, gozan de una gran ventaja: contienen poco gas y en ellas no se están formando nuevas estrellas, lo que proporciona una visión muy limpia del centro

galáctico. En cambio, las galaxias de disco, donde sospechábamos que podrían esconderse la mayoría de los agujeros negros de tamaño intermedio, presentan altas tasas de formación estelar. Y la luz de las estrellas jóvenes, así como el gas y el polvo asociados, contribuyen a ocultar el agujero activo.

Para sortear estas dificultades, Ho y yo acudimos en el año 2004 a una inestimable base de datos, diseñada para encontrar agujas en el pajar cósmico: el Sondeo Digital del Cielo Sloan. Desde hace más de diez años, un telescopio de Nuevo México, dedicado en exclusiva a este proyecto, ha estado tomando imágenes de más de una cuarta parte del cielo y ha obtenido los espectros de millones de estrellas y galaxias.

Tras examinar los espectros de 200.000 galaxias, encontramos 19 candidatas similares a NGC 4395: galaxias menores y con agujeros negros cuya masa estimamos en menos de un millón de masas solares. A lo largo de los últimos años, estudios similares basados en datos más recientes del muestreo Sloan han aumentado el total a unas tres docenas de agujeros negros por debajo de un millón de masas solares, y más de un centenar justo por encima de ese umbral.

Los espectros del sondeo Sloan nos indican la velocidad a la que el gas caliente orbita en torno al agujero negro. Pero esta cantidad solo aporta la mitad de la información necesaria para calcular la masa del objeto; el dato restante es el radio de la órbita. Sin embargo, después de haber observado los mismos procesos en un gran número agujeros negros supermasivos, sabemos cómo suele relacionarse la velocidad de rotación del gas con la masa del objeto: cuanto menor es este, con mayor lentitud gira aquel. Si extrapolamos esa relación a masas más bajas, podemos identificar los agujeros negros de menor tamaño entre los datos del muestreo Sloan.

La búsqueda confirmó las sospechas que habían despertado NGC 4395 y POX 52: existe toda una población de agujeros negros de masa intermedia que, además, suelen encontrarse en las galaxias sin bulbo. No obstante, no parece que esta clase de objetos abunde en el universo: solo una de cada 2.000 galaxias lo bastante brillantes como para poder estudiarlas presenta indicios de un agujero negro activo de masa intermedia.

Cabe pensar que las búsquedas basadas en el muestreo Sloan no revelen todos los agujeros negros existentes, puesto que, al ceñirse este al intervalo del óptico (las longitudes de onda que podemos percibir con nuestros ojos), quizás estemos pasando por alto agujeros negros escondidos tras nubes de polvo. Para sortear este obstáculo, se examinan las longitudes de onda que pueden atravesar el polvo, como los rayos X, las ondas de radio o el infrarrojo medio. Shobita Satyapal, de la Universidad George Mason, y sus colaboradores han realizado medidas en el infrarrojo. La luz ultravioleta extrema emitida por el material que cae hacia el agujero negro haría estragos en el medio circundante, con lo que generaría especies poco comunes, como estados excitados de neón altamente ionizado. A su vez, la emisión de estos iones dejaría una impronta característica en el espectro del infrarrojo medio. Pero no existen demasiadas galaxias que se presten a este tipo de estudios, por lo que el equipo de Satyapal apenas detectó un par de nuevos agujeros negros activos de masa intermedia. Otras investigaciones en rayos X y ondas de radio han hallado algunos indicios de pesos medios, así como de agujeros negros supermasivos no demasiado grandes. En la actualidad se están llevando a cabo observaciones de seguimiento para confirmar la naturaleza de estos candidatos.

Los resultados obtenidos hasta ahora parecen sugerir que, en efecto, las observaciones en el óptico habrían pasado por alto algunos agujeros negros de peso intermedio en galaxias sin bulbo. Sin embargo, estos no abundarían tanto como para ser la norma. Aún estamos a la espera del veredicto definitivo, pero puede que solo entre el 5 y el 25 por ciento de las galaxias sin bulbo albergue un agujero negro por encima del umbral de detección.

GALAXIAS Y AGUJEROS NEGROS

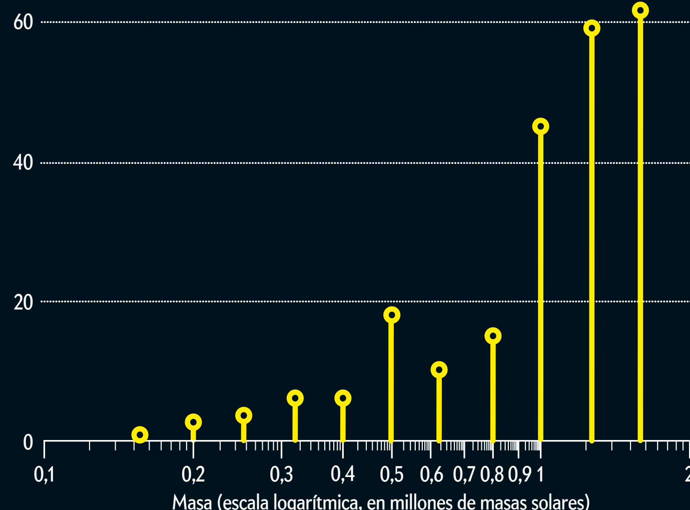
El estudio de los agujeros negros de tamaño intermedio en las galaxias sin bulbo quizá nos ayude a entender la relación entre los agujeros negros supermasivos y los grandes bulbos galácticos. Tal y como mencionábamos antes, los agujeros supermasivos suelen contener en tor-

«PESOS MEDIOS» CONOCIDOS

Indicios del colapso directo de nubes de gas

Los estudios en el óptico de 500.000 galaxias han revelado más de un centenar de agujeros negros cuya masa se estima inferior a los dos millones de masas solares (*gráfico*). Otras búsquedas en el infrarrojo, rayos X y ondas de radio han detectado candidatos adicionales. Hasta ahora, todo apunta a que la mayoría de las galaxias sin bulbo no albergan un agujero negro de tamaño intermedio. Estas observaciones apoyan la teoría del colapso directo como principal mecanismo de formación de los agujeros negros semilla. Si estos se debiesen al colapso estelar, deberían haberse hallado muchos más candidatos con masas entre diez mil y un millón de veces la del Sol.

Número de agujeros negros de masa intermedia detectados mediante observaciones en el óptico



JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*); FUENTE: «A NEW SAMPLE OF LOW-MASS BLACK HOLES IN ACTIVE GALAXIES», POR JENNY E. GREENE Y LUIS C. HO, EN *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 670, N.º 1; 20 DE NOVIEMBRE DE 2007

no a una milésima parte de la masa del bulbo en el que residen, lo que parece apuntar a un vínculo entre el crecimiento del agujero negro y el de la galaxia que lo hospeda. Si dicha correlación se establece durante la formación del bulbo, entonces las propiedades de las galaxias sin bulbo y las de sus pesos medios deberían ser independientes.

Una de las principales teorías para explicar el nexo entre las galaxias con bulbo y sus agujeros negros sostiene que tanto las galaxias elípticas como los grandes bulbos se habrían formado a partir de la fusión de galaxias de disco. En el proceso, las fuerzas gravitatorias deforman los discos, las órbitas de las estrellas abandonan su plano original y se redistribuyen de manera aleatoria, lo que explicaría la forma elíptica característica del bulbo o la galaxia resultante. Durante la fusión, las nubes de gas colisionan y son canalizadas hacia el centro de la galaxia, lo que desencadena una elevada tasa de formación estelar. Al mismo tiempo, los agujeros negros de ambas galaxias también se fusionan y se alimentan del gas que se acumula en el centro. Así, los grandes bulbos y sus agujeros negros supermasivos evolucionarían a la par, de la mano de los procesos a gran escala que rigen la fusión entre galaxias. Por último, cuando el agujero negro alcanza una milésima parte de la masa del bulbo, su faceta de ventilador comienza a cobrar importancia: expulsa el gas del centro galáctico e inhibe su propio crecimiento.

Los agujeros negros de tamaño intermedio que residen en galaxias sin bulbo, como NGC 4395, no habrían gozado de semejantes banquetes. Estas semillas supervivientes habrían tenido que conformarse con el gas del centro galáctico, un proceso de pequeña magnitud que apenas guarda relación con los sucesos a gran escala que gobiernan la evolución global de la galaxia. Algunas galaxias sin bulbo podrían, de hecho, no haber alimentado ningún agujero negro. Este parece ser el caso de M33, una galaxia de aspecto muy similar a NGC 4395, que no contiene ningún agujero negro de masa superior a las 1500 masas solares. Cada vez más datos avalan esta relación entre el crecimiento del agujero negro y la formación del bulbo, si bien numerosos detalles quedan aún por elaborar y la cuestión no puede darse en absoluto por zanjada.

Con respecto a la creación de semillas, la escasez de agujeros negros de masa intermedia favorece la teoría del colapso directo de gas en el universo primitivo. Si los agujeros negros supermasivos hubiesen evolucionado a partir de remanentes estelares, casi todas las galaxias deberían contener un agujero negro de al menos 10.000 masas solares en su centro. Sin embargo, parece ser un hecho que la mayoría de las galaxias sin bulbo no albergan este tipo de objetos.

Existen otros indicios que apuntan asimismo al escenario de colapso directo. Por un lado, la débil correlación entre las masas de los pesos medios y las de sus galaxias se ajusta bastante mejor a las predicciones de este modelo. Además, resulta mucho más fácil crear un agujero de 1.000 millones de masas solares en apenas unos cientos de millones de años si partimos de una semilla de gran masa.

Por supuesto, estas conclusiones quizá cambien a medida que vayamos recabando más datos. Si observásemos galaxias más débiles que las registradas en el catálogo Sloan, la fracción de galaxias que contienen un agujero negro de tamaño intermedio podría aumentar o disminuir. O tal vez algunas galaxias contengan agujeros negros de masa intermedia lejos de su centro. La búsqueda presenta aún varios frentes abiertos.

Numerosas cuestiones clave distan de estar resueltas. ¿Son los agujeros negros de peso medio más comunes en unos tipos de galaxia que en otros? Una dependencia tal permitiría postular nuevas formas de interacción entre un agujero negro y su galaxia anfitriona, antes incluso de que los procesos de fusión provocasen la formación del bulbo y del agujero negro supermasivo. ¿Carecen de agujero negro la mayoría de las galaxias sin bulbo, o poseen uno, pero por debajo del umbral de detección actual? En tal caso, estaríamos hablando de objetos del orden de varios miles de masas solares que no podrían haberse formado por colapso directo, sino a partir de remanentes estelares. ¿O hay quizás en todas esas galaxias un agujero negro de tamaño considerable, de entre 10.000 y 100.000 masas solares, el cual no se encuentra engullendo materia y, por tanto, su entorno tampoco emite luz? Semejante posibilidad cambiaría por completo la conclusión de que los pesos medios escasean. Las respuestas a estas preguntas podrían alterar de manera radical nuestras teorías sobre la génesis de las galaxias y sobre el origen de los grandes agujeros negros supermasivos.


La galaxia NGC 4395, una galaxia de disco sin bulbo, fue la primera en mostrar signos de la presencia de un agujero negro de masa intermedia en su centro.

CORTESÍA DE BOB FRANKE, OBSERVATORIO FOCAL POINTE

PARA SABER MÁS

A low-mass central black hole in the bulgeless Seyfert 1 galaxy NGC 4395. A. V. Filippenko y L. C. Ho en *Astrophysical Journal*, vol. 588, n.º 1, págs. L13-L16, 1 de mayo de 2003. **arxiv.org/abs/astro-ph/0303429**

Active galactic nuclei with candidate intermediate-mass black holes. J. E. Greene y L. C. Ho en *Astrophysical Journal*, vol. 610, n.º 2, págs. 722-736, 1 de agosto de 2004. **arxiv.org/abs/astro-ph/0404110**

Nuclear activity in nearby galaxies. L. C. Ho en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 46, págs. 475-539, septiembre de 2008. **arxiv.org/abs/0803.2268**

Formation of supermassive black holes. M. Volonteri en *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 18, n.º 3, págs. 279-315, julio de 2010. **arxiv.org/abs/1003.4404**

Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges. J. Kormendy, R. Bender y M. E. Cornell en *Nature*, vol. 469, págs. 374-376, 20 de enero de 2011. **arxiv.org/abs/1101.3781**

Big black hole found in tiny galaxy. J. E. Greene en *Nature*, vol. 470, págs. 45-46, 3 de febrero de 2011.



JACK UNRUH

Gareth Dyke es paleontólogo en la Universidad de Southampton en Inglaterra. Ha estudiado la historia evolutiva de los dinosaurios y de las aves. Junto a István Fözy, del Museo de Historia Natural de Budapest, está escribiendo una novela inspirada en la vida del barón Franz Nopcsa.



PALEONTOLOGÍA

EL BARÓN DE LOS DINOSAURIOS

Las ideas heterodoxas propuestas por un aristócrata de Transilvania sobre la evolución de los dinosaurios se adelantaron varias décadas a su época

Gareth Dyke

Corría el año 1906. Un hombre pequeño y elegante se acerca al esqueleto gigante de *Diplodocus* expuesto en el gran vestíbulo del Museo Británico de Historia Natural en Londres. Con cuidado, coge uno de los huesos del enorme dedo del dinosaurio, lo extrae del soporte metálico, le da la vuelta y, con delicadeza, vuelve a colocarlo en su sitio. Más tarde, en una carta a un colega, le contaría que su gesto no había sido apreciado. Los funcionarios del museo deberían haberlo sabido. El visitante era Franz Nopcsa (pronunciado «nopcha»), barón de Szacsal, en Transilvania.

Además de pertenecer a la nobleza, el barón era una autoridad reconocida en dinosaurios y otros animales fósiles. Vio que el hueso del dedo del *Diplodocus* estaba mal orientado y solo trataba de enmendar el error. Aunque Nopcsa no se granjeó el respeto del personal del museo, la historia ha sido mucho más grata con él. Entre los paleontólogos actuales es reconocido por ser el descubridor y haber descrito los primeros dinosaurios del centro de Europa. Pero, a menudo, su vida personal ha eclipsado sus logros intelectuales. Aventurero, excéntrico y tremendamente ambicioso, Nopcsa era un hombre muy pintoresco. Fue espía durante la Primera Guerra Mundial y pretendió el trono de Albania. Además, no ocultaba su condición de homosexual; su amante y secretario era un albanés mucho más joven que él, llamado Bajazid Elmaz Doda.

Con todo, tal y como han puesto de manifiesto algunos descubrimientos recientes, Nopcsa fue mucho más que un mero coleccionista de fósiles que merezca ser recordado solo por su actividad política y su agitada vida personal. Fue pionero en el uso de ciertas técnicas de análisis de fósiles que siguen utilizándose en la investigación paleontológica moderna. Además, algunas de sus teorías sobre la evolución de los dinosaurios se avanzaron varias décadas a su tiempo. Nopcsa afirmaba que sus dinosaurios de Transilvania eran fundamentales para entender la evolución de los dinosaurios a escala global. En los últimos años, gracias a los hallazgos de nuevos fósiles, los científicos han empezado a apreciar cuánta razón tenía.

LA ISLA DE LOS ENANOS

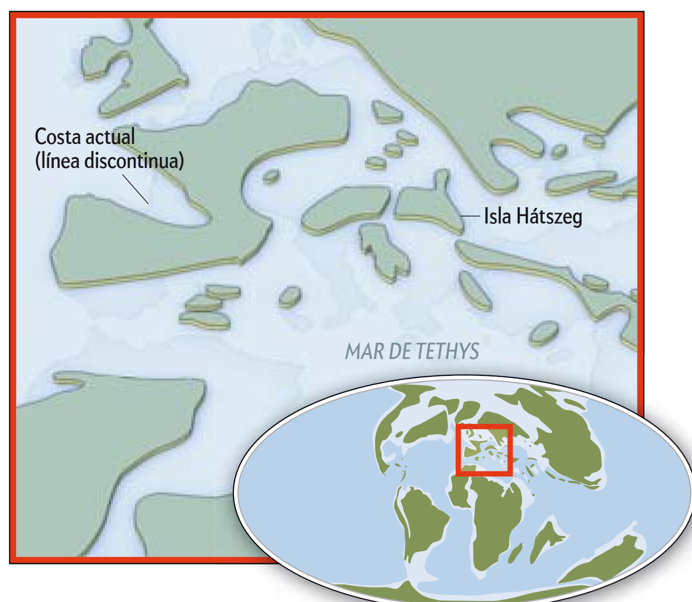
El primer encuentro de Nopcsa con los fósiles sucedió en 1895, cuando su hermana Ilona descubrió unos huesos de gran tamaño en una de las propiedades familiares de Transilvania, en aquel momento parte del imperio austrohúngaro. Nopcsa se apropió sin dudarlo de ellos y se llevó algunos para mostrárselos a un profesor de geología de Viena, donde estaba cursando su educación secundaria. El profesor le dijo que pertenecían a dinosaurios y le ofreció la ayuda de uno de los técnicos del departamento para recoger más fósiles y preparar una descripción formal. A pesar de

sus escasos conocimientos sobre paleontología, el joven Nopcsa, con solo dieciocho años, decidió seguir adelante por su cuenta y comenzó a estudiar día y noche para aprender anatomía. Y debió hacerlo con rapidez, puesto que al cabo de un año había escrito un artículo sobre los huesos descubiertos por Ilona, donde describía una nueva especie de dinosaurio ornitópodo de Transilvania que posteriormente se llamó *Telmatosaurus*.

Así comenzó la larga y prolífica carrera de Nopcsa. Durante los 35 años siguientes publicó más de un centenar de artículos científicos sobre fósiles, muchos de ellos de vanguardia. Fue uno de los primeros en investigar si la anatomía de los animales extintos y el modo en que habían fosilizado podían estudiarse conjuntamente para comprender su forma de vida. Defendió la idea victoriana de que las aves eran un tipo de dinosaurios y no un pariente lejano de los reptiles, tal y como sostenían otros científicos. En la actualidad, la primera hipótesis es aceptada por la amplia mayoría de los paleontólogos. Entre otros muchos logros, Nopcsa también cartografió la geología de gran parte de Europa central.

En el curso de las investigaciones, Nopcsa viajó mucho. Pero sus trabajos más importantes derivaron de los hallazgos realizados en su tierra natal. El barón se dio cuenta de que *Telmatosaurus*, el saurópodo enano *Magyarosaurus* (género propuesto por el paleontólogo alemán Friedrich von Huene para sustituir el nombre acuñado por Nopcsa de *Titanosaurus*) y otros dinosaurios descubiertos en sus propiedades eran más pequeños que otras especies relacionadas con ellos. Por mencionar uno, *Magyarosaurus* medía solo 6 metros de longitud, mucho menos que otros saurópodos que solían alcanzar entre 15 y 20 metros. Gracias a sus notables conocimientos de geología, Nopcsa pudo determinar que cuando *Magyarosaurus* habitó Transilvania, hace unos 70 millones de años, al final del Cretácico, un mar cálido y poco profundo llamado Tethys cubría la mayor parte del sur de Europa. Solo las regiones elevadas formarían islas y serían habitables por los animales terrestres. También sabía que algunos mamíferos insulares, como los elefantes del Mediterráneo extinguidos en fecha reciente, evolucionaron mediante la reducción de su tamaño corporal, presumiblemente una adaptación a la vida en ambientes con recursos limitados, como son las islas. Reuniendo esta información, en 1914 propuso que los lugares donde yacían sus fósiles de dinosaurios habían sido parte de una isla del mar de Tethys que emergía en esta parte de Europa. Denominó a esta isla Hátszeg y afirmó que esos dinosaurios habían adquirido sus pequeñas dimensiones como resultado de la insularidad.

Aunque otros científicos contemporáneos de Nopcsa conocían la existencia de elefantes del tamaño de un pony en Creta y otras islas del Mediterráneo, nadie antes había propuesto que ese enanismo se había dado en dinosaurios. La brillante teoría del barón cayó en el olvido durante mucho tiempo. Pero a finales de los años setenta del siglo pasado, el renovado interés por los especímenes transilvanos del Cretácico superior puso de nuevo sobre la mesa el enanismo propuesto por Nopcsa. Desde entonces, esta hipótesis ha ganado adeptos, en parte, gracias al hallazgo de otros fósiles de dinosaurios que han confirmado que



Antiguas islas, como Hátszeg, bañadas por el mar que cubría el sur de Europa durante el Cretácico superior, sirvieron de refugio y corredor natural para algunos dinosaurios que evolucionaron hasta reducir su talla.

los dinosaurios de Hátszeg eran de menor tamaño que sus parientes de otras partes de Europa, Asia y Norteamérica.

Sin ir más lejos, mi propio trabajo ha reforzado alguna de las ideas de Nopcsa. Al estudiar una colección del Cretácico inferior recuperada en los años setenta en una mina de bauxita de Transilvania, descubrí entre los restos algunos fósiles de pequeños pájaros y pterosaurios. A juzgar por los elementos conservados de las alas, llegué a la conjetura de que estas criaturas eran capaces de volar largas distancias. En un artículo publicado en *Palaeontology* afirmaba que precisamente este era el tipo de animales voladores que esperaríamos encontrar en una isla solitaria. De hecho, las especies preservadas en la colección de la mina de bauxita guardan semejanza con las que Nopcsa halló en Hátszeg, unos centenares de kilómetros al este. El yacimiento de la mina de bauxita formaría parte de otra isla más antigua de un archipiélago de época cretácica bañado por el mar de Tethys.

Además, pruebas obtenidas mediante una técnica ideada por el propio Nopcsa han ofrecido el mejor respaldo a su hipótesis sobre el enanismo insular. En 1930 Nopcsa publicó un artículo revolucionario en el que describía cómo había utilizado la estructura microscópica del hueso, la histología, para demostrar que un fósil de una supuesta nueva especie de dinosaurio con «pico de pato» hallado en Norteamérica correspondía, en realidad, a un individuo juvenil de una especie ya descrita. Descubrió que la edad de muerte de un animal podía calcularse observando al microscopio la estructura histológica de finas láminas de hueso, de una forma similar al modo en que se cuentan los anillos de crecimiento para averiguar la edad de un árbol.

FUENTE: «AN UNUSUAL DINOSAUR FROM THE LATE CRETACEOUS OF ROMANIA AND THE ISLAND RULE», DE HANS-DIETER SUES, EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 107, N.º 35; 31 DE AGOSTO DE 2010 (*islas*); *THE CHANGING FACE OF THE EARTH*, DE BRUNO VRIELYNCK Y PHILIPPE BOUYSSE; UNESCO PUBLISHING/COMMISSION OF THE GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD, 2003 (*planisferio*)

EN SÍNTESIS

Franz Nopcsa fue un noble de Transilvania de finales del siglo XIX y principios del XX apasionado por los fósiles.

Más conocido por su faceta política y su vida personal, fue un pionero en el uso de algunas técnicas paleontológicas. Asimismo, formuló teorías sobre la evolución de los dinosaurios y su dispersión en todo el planeta.

Descubrimientos recientes han demostrado que algunas de sus ideas científicas eran proféticas.

Cuando Nopcsa propuso su hipótesis sobre el enanismo de los dinosaurios, uno de los puntos débiles era que no podía excluir la posibilidad de que sus dinosaurios fuesen pequeños, simplemente, porque se trataba de individuos jóvenes. Nopcsa murió antes de poder aplicar su técnica histológica al problema. Pero a finales del decenio pasado un grupo de paleontólogos alemanes, americanos y rumanos llevaron a cabo estudios histológicos de los fósiles de *Magyarosaurus*. En su trabajo, publicado en 2010 en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, concluyeron que este pequeño saurópodo ya había completado su crecimiento, dando la razón a la interpretación de Nopcsa sobre el enanismo insular.

El análisis histológico de los huesos, muy utilizado por los paleontólogos en la actualidad, también ha proporcionado datos sobre otro de los temas preferidos de Nopcsa: la evolución de las aves. En 2009, un equipo de investigadores de Alemania, China y EE.UU. publicó en la revista *PLoS ONE* que algunas de las primeras aves, entre ellas *Archaeopterix* (con 140 millones de años de antigüedad) poseían una estructura ósea que indicaba una velocidad de crecimiento tres veces menor que la que se observa en las aves actuales. Este patrón guarda mayor semejanza con el de los reptiles de «sangre fría» que con el de las aves de «sangre caliente» actuales. Así pues, el ritmo de crecimiento extremadamente rápido que tanto caracteriza a las aves, habría evolucionado mucho más tarde de lo que se pensaba.

DINOSAURIOS EN MOVIMIENTO

Tal y como el propio Nopcsa sabía, la importancia de sus dinosaurios transilvanos trasciende las implicaciones de su teoría del enanismo insular. Dado que al final del Cretácico la mayor parte de Europa yacía bajo el mar de Tethys, los fósiles de Transilvania constituyen uno de los pocos restos de dinosaurios europeos de este período. Curiosamente, la mayoría de las especies halladas aquí, incluido el ornitópodo de Hátszeg *Telmatosaurus*, tienen homólogos en Asia y América del Norte pero no se encuentran en el hemisferio sur. Esta distribución geográfica sugiere que durante el Cretácico superior Transilvania fue un puente de conexión entre las masas terrestres de Europa y las de Asia y Norteamérica. Los dinosaurios de Europa pudieron cruzar el Tethys y dispersarse por Asiamérica, y viceversa, gracias a la presencia de Hátszeg y otras islas que formarían un archipiélago entre los Alpes y el sudoeste de Asia.

Nuevos datos geológicos publicados en 2010 en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* indican que la isla de Hátszeg, al hallarse a medio camino entre el borde continental de Europa y el océano, pudo ser un lugar fundamental para permitir las migraciones de animales hacia el este y hacia el oeste. Así, los dinosaurios de Transilvania, en general, y de Hátszeg, en particular, constituirían la clave para entender la distribución global de los dinosaurios justo antes de alcanzar su cenit de diversidad, hace 65 millones de años. Este apogeo duraría poco, ya que el cataclismo provocado por un asteroide extinguió el grupo.

En una época en que la paleontología y la geología eran todavía jóvenes, y la teoría de la evolución era objeto de acalorados debates, las aportaciones de Nopcsa resultan clarividentes. Qué duda cabe que su origen aristocrático jugó a su favor, puesto que gracias a sus riquezas y su influencia en la corte austrohúngara, contó con medios fuera del alcance de la mayoría de los científicos. Pudo viajar libremente por todo el imperio, organizando expediciones para buscar fósiles, y visitar de forma regular los museos más importantes de Europa. Parecía disfrutar escapando de la vida cortesana, porque, sin reparo, se despojaba de sus mejores galas como noble vienés para vestirse como un pastor mientras exploraba los Balcanes. Gracias a su conocimiento de varios dialectos del albanés, Nopcsa desaparecía en las montañas de Albania durante meses o años, con la única compañía de su secretario y amante, Doda. En sus viajes por tierras albanesas, recopiló abundantes datos geológicos, meteorológicos y etnográficos durante más de una década. Muchos fueron publicados en las mejores revistas científicas de la época. Pero no parece que Nopcsa dejara la corte solo por razones académicas. En 1923, a un fósil de tortuga que había recogido en Transilvania, con 70 millones de años de antigüedad, lo denominó *Kallokibotion bajazidi* (cuyo género significa «bello y redondo») en honor a Doda.

Por desgracia para Nopcsa, diferentes sucesos mundiales parecieron conspirar para arrebatarle sus privilegios. En 1918, tras la derrota sufrida por Alemania y sus aliados, entre ellos el imperio austrohúngaro, la región de Transilvania fue cedida a Rumania. Perdió sus posesiones y rentas. Como consecuencia, tuvo que procurarse los medios para seguir manteniendo su estilo de vida de científico itinerante. Por este motivo, aceptó un trabajo como director del Instituto Húngaro de Geología y se trasladó a Budapest. Sin embargo, las obligaciones institucionales no congeniaban con su carácter. Al cabo de unos años, abandonó el cargo para reanudar sus viajes con Doda a bordo de una motocicleta, en un periplo que lo llevó a recorrer los Alpes e Italia en busca de fósiles y cartografiando la geología. Para seguir disponiendo de recursos, vendió la mayoría de sus colecciones de fósiles, incluidos sus preciados dinosaurios de Transilvania, al Museo Británico de Historia Natural de Londres, un lugar que había visitado con asiduidad en calidad de científico invitado.

Meses antes de su muerte, Nopcsa recibió una invitación de la Sociedad Geológica de Amberes. A pesar de la fiebre alta que padecía, decidió emprender el viaje. La noche antes de dar la conferencia cayó muy enfermo. Aun así, sin apenas preparación, impartió su lección en francés sobre la geología de Albania en un salón repleto de gente. Más tarde, cuando volvió a Budapest escribió en una carta a un amigo: «Siempre que hablo, la sala está llena sobre todo de damas que esperan oír historias de aventuras y pocas explicaciones científicas». Seguro que al aventurero barón de los dinosaurios le gustaba contentarlas.

Lamentablemente, la vida de Nopcsa tuvo un final trágico. El 25 de abril de 1933, el gran buscador de fósiles, en ese momento deprimido y en la indigencia, sirvió a Doda una taza de té mezclada con droga. Cuando su amante quedó sedado le disparó un tiro mortal en la cabeza y acto seguido hizo lo mismo consigo. En la desgarradora nota que dejó a la policía decía «La razón de mi suicidio es que mis nervios no pueden soportar nada más. He matado a mi amigo y secretario, el Sr. Bajazid Elmaz Doda, mientras dormía, sin que tuviera ni la más mínima idea de lo que iba a suceder, porque no quería abandonarlo enfermo y sumido en la pobreza, ya que habría padecido mucho». El barón hace mucho que murió, pero su legado científico sigue creciendo.

PARA SABER MÁS

Was dinosaurian physiology inherited by birds? Reconciling slow growth in *Archaeopteryx*. Gregory M. Erickson y otros en *Plos one*, n.º 10, 9 de octubre de 2009.

Small body size and extreme cortical bone remodeling indicate phyletic dwarfism in *Magyarosaurus dacus* (Sauropoda: Titanosauria). Koen Stein y otros en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Publicado en línea, 30 de abril de 2010.

European island faunas of the late Cretaceous-The Hateg island. Número especial de *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 293, n.os 3-4, 15 de julio de 2010.

Early Cretaceous (Berriasian) birds and pterosaurs from the Cornet Bauxite Mine, Romania. Gareth J. Dyke y otros en *Palaeontology*, vol. 54, n.º 1, págs. 79-95, enero de 2011.

por Christine Gorman

Peligros ocultos de la obesidad

El exceso de peso altera la salud, a veces mediante mecanismos sorprendentes

En la actualidad se sabe que el sobrepeso aumenta el riesgo de padecer enfermedades del corazón, accidentes cerebrovasculares y diabetes, y que la obesidad, definida como un peso superior al 20 por ciento del valor normal, resulta cada vez más frecuente. Según algunas estimaciones, en 2030 habrá en los Estados Unidos 65 millones de obesos más que hoy, lo que elevará en seis millones o más los casos de enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares, y en ocho millones los casos de diabetes de tipo 2. Muchos médicos se han encontrado ya con familias en las que los abuelos están más sanos y viven más que sus hijos y nietos.

Por si esos datos alarmantes no bastaran, algunos estudios realizados durante los últimos cinco años han demostrado que los costes de la epidemia de obesidad van todavía más lejos. Diferentes investigaciones han confirmado que el exceso de peso puede incidir sobre la salud mental (al empeorar la depresión o la enfermedad de Alzheimer), sobre la salud sexual y reproductiva, y sobre la calidad de vida, especialmente a medida que se envejece. Se cree que quizás el 25 por ciento de algunas enfermedades graves, entre las que se incluyen el cáncer de colon, de riñón y de esófago, están provocadas por el aumento de las tasas de obesidad y la inactividad física.

Las consecuencias, como puede observarse en las imágenes realizadas por TheVisualMD.com y basadas en los últimos datos conocidos, ofrecen un «viaje anatómico» aleccionador sobre los efectos a largo plazo de la obesidad en el organismo.



Acidez: en 2005, un estudio realizado en 450 individuos reveló que los adultos obesos presentan una probabilidad dos veces y media superior de padecer acidez que los que mantienen un peso normal. La causa podría ser que la grasa visceral empuja al estómago hacia arriba en el tórax.



Respiración fatigosa: la grasa visceral, que rodea los órganos internos, conlleva más problemas que la subcutánea, situada debajo de la piel. En la imagen superior, la grasa visceral presiona sobre el diafragma desde abajo, lo que limita la respiración al disminuir la expansión de los pulmones (*verde*).



Dolor articular: los kilos de más producen una sobrecarga en las rodillas. En esta imagen, el daño articular (*blanco*) provoca dolor y una disminución de la movilidad de la rodilla.

CORTESÍA DE THEVISUALMD.COM

Torso: vista de la sección transversal de una mujer obesa.



Depresión: una docena de estudios indican que la obesidad representa una causa importante de depresión, tal vez debido a una combinación de factores fisiológicos con la estigmatización social. Las neuronas de la imagen, de la corteza cerebral, se han reducido y deformado.





Disfunción sexual: ciertas sustancias inflamatorias liberadas por las células grasas pueden dañar las terminaciones nerviosas del pene (*arriba*) y alterar los vasos sanguíneos del clítoris (*abajo*), lo que impide la satisfacción sexual.

por Antonio Diéguez



Antonio Diéguez es catedrático de filosofía de la ciencia en la Universidad de Málaga.

Realismo científico. ¿Sigue el debate?

Antiguos problemas metafísicos, como la verdad y la realidad, replanteados a la nueva luz de la práctica científica

Si usted cree que la ciencia tiene entre sus objetivos centrales descubrir algunas verdades acerca del funcionamiento del universo, incluidos sus aspectos no directamente observables, y considera que probablemente alcanza ese objetivo cada vez que se comprueba que la realidad concuerda con las predicciones arriesgadas y novedosas realizadas desde alguna teoría (que la luz se curva en campos gravitatorios, por ejemplo); si usted cree que cuando un libro de física dice «el electrón posee carga eléctrica negativa», el mejor modo de entender esta frase es suponer que existe una entidad real, independiente de nuestras teorías, a la que hemos dado en llamar electrón, y que entre sus propiedades está el tener carga eléctrica negativa, entonces, quizá no lo sepa, pero es usted un realista científico. Y si es usted un realista científico, es muy posible que no sea usted físico ni filósofo.

Los físicos tienen buenas razones para no ser realistas, ya que una de sus teorías favoritas, la cuántica, es difícilmente compatible con el realismo. En su visión tradicionalmente más aceptada, la interpretación de Copenhague, la teoría cuántica no atribuye valores definidos a ciertas propiedades de los sistemas cuánticos hasta tanto no hayan sido observados o medidos. Esas propiedades solo adquieren un valor en el proceso mismo de medición, de modo que puede decirse que no existen con independencia del observador. Hay interpretaciones realistas de la mecánica cuántica, pero son minoritarias —si bien sus partidarios han crecido durante los últimos años—. El coste a pagar por ellas es la aceptación de acciones instantáneas a distancia entre dos partículas que han interactuado, universos que se bifurcan tras un acto de medición u otras rarezas ontológicas.

Las razones de los filósofos para no aceptar el realismo son más brumosas y variadas. Pero quizá no sería desorientador decir que buena parte del antirrealismo filosófico contemporáneo hunde sus raíces en las ideas de Nietzsche sobre los límites de nuestro lenguaje y el carácter insoslayablemente interpretativo de nuestras diversas perspectivas sobre el mundo, así como en la crítica heideggeriana a la dicotomía sujeto/objeto y en su insistencia en que desvelamos la realidad y nos relacionamos con ella de modos que están siempre históricamente condicionados. Ambas ideas han llevado a buena parte de la comunidad filosófica a considerar un anatema la vieja concepción del conocimiento como una representación verdadera de la realidad objetiva.

En lo que respecta al realismo científico, conviene aclarar un punto en el que muchos antirrealistas suelen escollar una y otra vez. El realismo científico no afirma que nuestras teorías actuales sean completamente verdaderas o que se hallen tan cerca de la verdad total que no serán ya sustituidas en el futuro y que, por tanto, podemos estar seguros de que el mobiliario del universo es el que la ciencia actual dictamina. La mayor parte de los realistas, y ciertamente algunos de los más conocidos, como Karl Popper o Ilkka Niiniluoto, de la Universidad de Helsinki, son falibilistas; creen que incluso las mejores teorías científicas actuales podrían resultar falsas. Es más, una de las formas en las que se puede caracterizar el realismo es mediante esa misma afirmación: siempre cabe la posibilidad de que nuestras mejores teorías sean falsas. Algunos antirrealistas de orientación pragmatista piensan, sin embargo, que eso no podría mantenerse en un hipotético estadio final de la ciencia. Según ellos, la mejor teoría que pudiera alcanzarse en ese estadio ideal sería, por definición, verdadera. El realista cree, por el contrario, que incluso entonces podríamos estar equivocados en nuestras ideas acerca del universo.

Tampoco es correcto afirmar, como hace uno de los más importantes filósofos



antirrealistas actuales, Bas van Fraassen, de la Universidad estatal de San Francisco, que, según el realismo, la aceptación de una teoría por parte de los científicos siempre implica que estos creen en su verdad literal. Los realistas son conscientes de que los científicos pueden aceptar teorías por muy diversas razones y, en ocasiones, sin creer necesariamente en su verdad. Planck aceptó el cuanto de acción como un artificio matemático, sin creer que la realidad fuera exactamente así. Muchos científicos aceptan ideas que no consideran verdaderas, solo porque creen que son prometedoras y que, en todo caso, trabajar en ellas tendrá resultados beneficiosos para la resolución de algún problema. El realismo es una propuesta acerca del mejor modo de interpretar nuestras teorías científicas, no una tesis acerca de los motivos para aceptarlas o de las creencias de los científicos sobre ellas.

Es interesante destacar una asimetría entre el realismo y el antirrealismo que casi nunca se señala. El realismo puede aceptar que no todas las teorías o hipótesis científicas han de ser interpretadas de forma realista. Puede aceptar, como hemos dicho, que los científicos han sustentado en ocasiones teorías por razones instrumentales o exploratorias, como hicieron con la teoría atómica de Dalton hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XIX. El antirrealismo, en cambio, suele sostener que *todas* las teorías científicas han de interpretarse de forma no realista, como meros instrumentos de cálculo, como ficciones útiles, como descripciones empíricamente adecuadas, pero no estrictamente verdaderas.

Otro malentendido frecuente consiste en identificar el realismo científico con el realismo ingenuo, es decir, con la idea de que nuestra mente es un receptor pasivo, un espejo de la naturaleza, y que nuestras teorías científicas nos permiten acceder al punto de vista de Dios: una perspectiva única que refleja la realidad tal cual es en sí misma. Puede que en el pasado algunos realistas defendieran algo semejante —aunque en mi opinión sería difícil encontrarlos—, pero el realismo actual no tiene ninguna dificultad para reconocer el papel activo del sujeto y el carácter culturalmente construido de nuestros esquemas conceptuales. Puede admitir también que el mundo puede ser conceptualizado de muy diversas maneras, y que no existe *la* conceptualización perfecta. Solo que el realista no cree que eso impida un conocimiento genuino de la realidad.

Por decirlo de una forma escueta, lo que el realismo científico sostiene es que:

a) Existe hipotéticamente un mundo independiente de la mente del observador que nuestras teorías científicas pretenden conocer.
b) Nuestras teorías científicas nos proporcionan un conocimiento adecuado (aunque siempre perfectible) de ese mundo.
c) El enorme éxito predictivo de nuestras teorías científicas ha de deberse a que estas contienen muchas afirmaciones verdaderas acerca de la realidad.
d) Estas afirmaciones verdaderas no se restringen solo al ámbito de lo directamente observable, sino también a entidades no observables.
e) La verdad debe entenderse en el sentido clásico de la correspondencia entre el contenido de nuestros enunciados y la realidad.
f) Las teorías científicas actuales son mejores que las del pasado no solo porque resuelven más y mejores problemas, sino porque son más verdaderas.

Los realistas piensan que su punto fuerte es la tesis *c*. La forma que suele tomar en sus textos es la del argumento de «no hay milagros». El sorprendente éxito predictivo de la ciencia (predicción de hechos desconocidos o precisión extrema) sería un milagro si las teorías implicadas no fueran al menos aproximadamente verdaderas. Un cierto éxito predictivo y práctico resulta posible mediante teorías falsas, pero un éxito continuado y repetido en circunstancias muy diversas solo es posible si, de alguna manera, nuestras teorías «han tocado hueso» en la realidad y la han cortado por sus junturas.

El realismo científico se enfrenta, no obstante, a poderosas objeciones. Dos de las más citadas son la *inducción pesimista* y la *infradeterminación* de las teorías por la evidencia empírica.

La inducción pesimista es una objeción de tipo histórico formulada en 1981 por el filósofo estadounidense Larry Laudan, hoy en la Universidad Nacional Autónoma de México. Laudan señaló una serie de ejemplos de teorías que tuvieron éxito y que, sin embargo, hoy consideramos falsas: la teoría geocéntrica de Ptolomeo, la teoría del flogisto, la del éter electromagnético... Laudan sostuvo que si tomamos estos casos del pasado, lo que cabe inferir es que también en el futuro el éxito de las teorías seguirá desligado de su supuesta verdad. O dicho de otro modo: no hay ninguna conexión necesaria entre verdad y éxito predictivo. La respuesta de los realistas ha consistido en mostrar que el éxito en los ejemplos citados por Laudan no es el que ellos tienen en mente (la capacidad de realizar predicciones novedosas) y que en las pocas teorías falsas que condujeron a este tipo de éxito, la parte responsable de la predicción sigue siendo correcta.

La tesis de la infradeterminación, por su parte, sostiene que ante cualquier evidencia empírica que se nos presente es siempre posible hacer que esta encaje con teorías distintas y mutuamente incompatibles, con lo cual no puede decirse que la evidencia empírica apoye la verdad de ninguna de esas teorías en concreto. Es, pues, siempre posible formular una teoría empíricamente equivalente a cualquier teoría dada, pero incompatible con ella sobre aspectos no observables. Puesto que ambas conducirán a las mismas predicciones, pero no podrán ser ambas verdaderas, ya que difieren en la ontología que postulan, la verdad no puede ser la explicación del éxito predictivo de esas teorías. Las réplicas de los realistas a esta objeción han ido desde la negación de la posibilidad *real* de dos teorías así (empíricamente equivalentes ante *toda* evidencia posible), hasta la afirmación de que, si se diera tal caso, siempre habría elementos de juicio adicionales con valor epistémico para elegir una de ellas. La misma evidencia empírica podría en tal caso no apoyar con la misma fuerza a las dos teorías.

Por supuesto, la discusión sobre esas y otras objeciones formuladas continúa, y no parece que nadie pueda atribuirse por el momento una victoria definitiva. Entretanto, el debate ha provocado que algunas cuestiones metafísicas pasen al primer plano, y ello dentro de una tradición de pensamiento que comenzó con una fuerte carga antimetafísica. Se trata de una situación paradójica, pero interesante.

PARA SABER MÁS

Realismo científico. Una introducción al debate actual en la filosofía de la ciencia. Antonio Diéguez. Universidad de Málaga, 1998.
Critical scientific realism. Ilkka Niiniluoto. Oxford University Press, 1999.
A metaphysics for scientific realism. Anjan Chakrvartty. Cambridge University Press, 2007.
Knowing the structure of nature. Stathis Psillos. Palgrave Macmillan, 2009.

por Juan Lerma

Juan Lerma es presidente de la Sociedad Española de Neurociencia y director del Instituto de Neurociencias del CSIC y la Universidad Miguel Hernández.



El gran reto

Pese a los enormes avances realizados por la investigación neurocientífica, seguimos sin comprender qué nos hace conscientes o qué determina nuestro comportamiento

El Congreso de los Diputados, a petición de la Sociedad Española de Neurociencia (SENC), declaró el 2012 Año de la Neurociencia en España. Esta iniciativa ofrece una oportunidad extraordinaria para dar un impulso a la investigación neurocientífica española. Desde la SENC deseamos trasmitir los progresos realizados en el estudio del cerebro a la vez que ilustrar cuánto queda por hacer. Asimismo queremos hacer partícipe a la sociedad civil de que el progreso de la ciencia, en concreto de la neurociencia, resulta fundamental para nuestro desarrollo como seres humanos, por lo que es tarea de todos afrontar el enorme desafío que plantea el estudio del cerebro. De hecho, solo a través de los estudios neurocientíficos podremos llegar a curar enfermedades como el alzhéimer, la depresión o la esquizofrenia.

Si uno siente la curiosidad de mirar en Wikipedia si acaso hay una lista de problemas neurocientíficos sin resolver, encuentra que, efectivamente, la hay: en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_neuroscience. Sin embargo, esta lista se vio discutida en su día. Mientras algunos opinaban que el enigma neurocientífico esencial era el correlato neuronal de la conciencia, otros, más drásticos, clamaban que *todos* los problemas en neurociencia están sin resolver. Si bien uno puede pensar que en cualquier campo científico existen infinidad de problemas sin resolver, ello resulta más evidente en lo que atañe al cerebro, y más concretamente al cerebro humano, puesto que desconocemos muchos de los aspectos más básicos de su funcionamiento. Al enigma de las bases neuronales de la conciencia se le suman otros. Seguimos sin comprender el modo en que el cerebro aprende o recuerda, por qué el sueño resulta imprescindible o cómo el cerebro integra la información sensorial (recibida a veces de forma distorsionada o fragmentada) en forma de percepción completa y correcta.

Así pues, si tuviera que enumerar los retos que la neurociencia tiene por delante, diría que necesitamos expandir nuestro conocimiento sobre la percepción, el aprendizaje, la plasticidad cerebral y todos los mecanismos cognitivos que finalmente determinan nuestra conducta. Cómo se genera este comportamiento es también una cuestión relevante. Naturalmente, estas propiedades emergentes surgen de la interacción entre moléculas, neuronas y circuitos. En la actualidad disponemos de información detallada del modo en que estos elementos interactúan, constituyendo bloques fundamentales de organización cerebral. Pero desconocemos todavía la forma en que estos circuitos y sistemas permiten a un individuo realizar tareas, si bien sencillas, con gran precisión.



El siglo xx fue la época de oro de la neurociencia. Las exquisitas descripciones de Ramón y Cajal acerca de la estructura del sistema nervioso y la enunciación de la teoría neuronal, por un lado, y la ley de polarización dinámica, por otro, sentaron las bases de la neurociencia moderna. Durante muchos años, los expertos no hicieron otra cosa que corroborar, con las nuevas técnicas disponibles, lo que Cajal había postulado. Más tarde llegaría una plétora de grandes descubrimientos: la generación y conducción del impulso nervioso, los neurotrasmisores, las bases y reglas de la comunicación neuronal, muchos de los genes que determinan el desarrollo neural, etcétera.

Todo ello ha sido posible gracias a la emergencia de lo que hoy llamamos neurociencia, que no es otra cosa que el conjunto de disciplinas científicas al servicio común de entender el sistema nervioso. La neurociencia, por tanto, informa sobre el funcionamiento de nuestras sensaciones, pensamientos, emociones, sobre nuestra conducta, nuestra creatividad e inteligencia. A las clásicas anatomía y neurofisiología se han unido la neuroquímica, la neurobiología molecular, la psicología, la psiquiatría, la neurofarmacología y la bioinformática, entre otras. Los avances en neurociencia resultan fundamentales para comprender nuestra naturaleza humana. Asimismo, constituyen la única vía para obtener medios con los que combatir enfermedades neurológicas y mentales que causan un gran sufrimiento, amén de acarrear importantes costes económicos, personales y sociales.

Pero no solo eso. El conocimiento neurocientífico ha de tener un alto impacto en nuestra forma de vida y relaciones sociales. Los sistemas de enseñanza deberían estar adaptados a la capacidad cerebral de aprender. Los planes de estudio habrían de optimizarse de acuerdo a determinadas pautas biológicas cerebrales. Sirva de ilustración decir que el entorno social en el que el niño se desenvuelve parece influir en el desarrollo de su cerebro. Estudios neurocientíficos en humanos y modelos animales han demostrado que la salud mental o el rendimiento académico pueden verse afectados por el nivel socioeconómico de la familia. Este hallazgo podría poner en cuestión la llamada igualdad de oportunidades porque, si bien estos efectos son en parte reversibles, hay aspectos de la estructura cerebral que quedan afectados.

por Pere Castells



Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

Las nuevas pasteurizaciones

El tratamiento con altas presiones permite alargar la vida útil de los alimentos sin alterar sus propiedades organolépticas

Desde tiempos inmemoriales, la conservación de los alimentos ha sido la piedra angular en la que se ha basado la subsistencia de la humanidad. El descubrimiento del fuego permitió hacer los alimentos más digeribles, pero también mejorar su conservación. La relación entre la ciencia y la cocina se basó, durante siglos, en la búsqueda de la ampliación de la vida útil de consumo de los alimentos. Así, y desde épocas muy remotas, amén de la acción del calor, también el ahumado, la salazón, el encurtido y el confitado en azúcares o en grasas han constituido la base de la alimentación de los pueblos.

En 1795, en plena revolución industrial, Nicholas Appert inventó la apertización, técnica basada en la acción del calor que permitió conservar los alimentos en latas. Tras perfeccionar el método, el médico Louis Pasteur publicó en 1864 los detalles de una técnica de conservación innovadora: la pasteurización. En el siglo xx, las agencias de seguridad alimentaria comenzarían a exigir la aplicación de procedimientos que aseguraran la perdurabilidad de los alimentos en condiciones aptas para el consumo.

Los métodos de conservación se clasifican según se basen en procesos físicos o químicos. Entre los físicos se cuentan la aplicación de temperaturas elevadas (pasteurización, esterilización, uperización), temperaturas bajas (refrigeración, congelación), el control del agua libre (concentración, desecación) y de la presión osmótica (salado, confitado). Los procesos químicos consisten en la adición de conservantes (sulfitos, nitritos, sorbatos, etcétera). Con todo, cabe advertir que ningún conservante tiene la capacidad, en las dosis permitidas, de frenar una contaminación ya declarada; son, simplemente, preventivos. El panorama de la conservación de los alimentos ha permanecido, pues, casi invariable durante decenios.

A finales del siglo xx se empezaron a investigar, y en paralelo a desarrollar, técnicas que permitieran otros tipos de conservación. Una de ellas es la aplicación de altas presiones hidrostáticas (HPP, de *high pressure processing*). Consiste en someter los alimentos a presiones de entre 200 y 600 megapascales, habitualmente en frío. En estas condiciones, se produce una gran eliminación de microorganismos. Iniciada en 1990 por Rikimaru Hayashi, entonces en la Universidad de Kyoto, esta técnica ha sido objeto de varios estudios para certificar su fiabilidad. En 2008, Kiera M. Considine, de la Universidad de Cork, y sus colaboradores publicaron en *FEMS Microbiology Letters* un trabajo que demostraba el gran poder antimicrobiano del HPP.

Cuando se presenta una técnica nueva, siempre se compara con los métodos tradicionales. El trabajo que Craig Leadley, de la Asociación para la Investigación en Alimentación Campden y Chorleywood, y sus colaboradores publicaron en 2008 en *Innovative Food Science and Emerging Technologies* analizaba las diferencias entre la conservación por esterilización clásica y la esterilización por HPP aplicadas a los guisantes. Observaron que la HPP ofrecía mejores resultados en cuanto a textura, pero no en cuanto al color. El mismo año, el equipo de Indrawati Oey, en el Centro de Investigación en Nutrición y Ciencia de los Alimentos de Lovaina, estudiaron los efectos del HPP sobre el color, la textura y el sabor de frutas y vegetales.

Ya avanzado el siglo xxi, alrededor de 200 máquinas de HPP se encuentran operativas en todo el mundo. Se comercializan zumos de fruta, bivalvos, productos curados (jamón en lonchas) y platos preparados, todos tratados mediante esta técnica. Son productos que no pueden someterse a procesos térmicos, puesto que ello alteraría sus propiedades nutritivas y organolépticas. El HPP también ha abierto las puertas a la comercialización de platos preparados elaborados en frío o a temperaturas muy controladas, en los que la descontaminación mediante métodos térmicos sería impensable (puesto que destruirían el plato).

Pese a la eficacia de la técnica, su aplicación masiva entraña un grave inconveniente: las máquinas de HPP son muy voluminosas y caras. Requieren, por tanto, grandes espacios e inversiones difícilmente asequibles para pequeñas y medianas empresas alimentarias. Quizá si se lograra fabricar máquinas más pequeñas, y por tanto más económicas, la técnica resultaría más competitiva.

Últimamente se están investigando nuevos métodos con aplicación de altas presiones. Nos referimos a las altas presiones dinámicas (UHPH, de *ultra high pressure homogenisation*). En líquidos, permiten obtener emulsiones estables sin la intervención de agentes emulsionantes.

El futuro de las altas presiones ya es presente. En pocos años veremos en nuestras mesas alimentos y elaboraciones culinarias que habrán sido sometidos a estas técnicas. Y eso no es todo. Se están desarrollando otras técnicas no térmicas de conservación más novedosas todavía: pulsos eléctricos de alto voltaje, bioconservantes naturales y envases activos.



El jamón en lonchas tratado mediante altas presiones mantiene su frescor original y se conserva fuera de la nevera.





Davide Castelvecchi
es redactor científico
y colaborador
de *Scientific American*.

COMPORTAMIENTO ANIMAL

LA BRÚJULA INTERNA

El sentido magnético de los animales es real. Cada vez se está más cerca de revelar su funcionamiento

Davide Castelvecchi

CHRISTOPHER GRIFFITH (*fotografía*); FOTOCOMPOSICIÓN DE MEGAN CAPONETTO

En 2007, durante lo que le debieron parecer seis meses interminables, Sabine Begall pasó las noches ante su ordenador mirando fotografías de ganado que pastaba. Descargaba de Google Earth una imagen de satélite de unas tierras de pastos, etiquetaba una a una todas las vacas de la misma y, a continuación, descargaba otra imagen. Con ayuda de sus colaboradores, Begall, zoóloga de la Universidad de Duisburgo-Essen, terminó por realizar un descubrimiento. En promedio, los rumiantes parecían alinear su cuerpo con una ligera preferencia por el eje norte-sur. Pero no señalaban al norte verdadero, que podían haber localizado utilizando el sol como referencia. En lugar de ello, se orientaban hacia el polo norte magnético, cientos de kilómetros al sur del polo geográfico, en la zona septentrional de Canadá.

Una investigación posterior aportó nuevas pruebas sobre la capacidad de algunos animales del tamaño de las vacas para responder al campo magnético de la Tierra. El comportamiento de alineamiento se desvanecía en las inmediaciones de

líneas eléctricas de alta tensión, que enmascaraban las sutiles señales procedentes del planeta.

Hace solo unos decenios, los estudios como el de Begall habrían sido objeto de escarnio. Se suponía que la materia orgánica no reaccionaba ante campos magnéticos débiles como los de la Tierra, ya que los animales no se hallan equipados con imanes de barra que les sirvan de brújula. La creencia de Franz Anton Mesmer, en el siglo XVIII, sobre el «magnetismo animal» (animales que albergan en su cuerpo líquidos magnéticos) se había relegado desde hacía tiempo a los anales de la charlatanería.

Hoy en día, la comunidad científica acepta que determinados animales perciben los campos magnéticos y responden a ellos y que, en muchos de ellos, esa capacidad mejora su supervivencia (aunque la razón de la alineación magnética en el ganado constituye todavía un enigma). En realidad, el sentido magnético se ha descrito en docenas de especies: desde migradores estacionales, como los petirrojos y las mariposas monarca, hasta navegantes expertos, como las palomas mensajeras y las tortugas marinas; desde invertebrados como las langostas marinas, abejas de la miel y hormigas hasta mamíferos como las ratas topo y los elefantes marinos, y desde bacterias minúsculas hasta ballenas colosales.

Sin embargo, se desconoce el modo en que se orientan los organismos, a excepción de las bacterias. El magnetismo representa el sentido del que menos cosas sabemos, señala Steven M. Reppert, neurobiólogo de la facultad de medicina de la Universidad de Massachusetts en Worcester.

Pero en el último decenio, grupos de biólogos, geocientíficos y físicos han empezado a señalar posibles mecanismos y estructuras anatómicas que intervendrían en tal fenómeno. Aunque ninguna de estas hipótesis ha obtenido aún la aceptación de toda la comunidad científica, las pruebas experimentales aportadas hasta ahora resultan sugerentes. Algunos animales podrían incluso albergar más de un tipo de órgano magnético. Y mientras que determinados sensores biológicos de campos magnéticos parecen comportarse en gran parte como brújulas imantadas, otros podrían tener su fundamento en sutiles efectos cuánticos.

El tema sigue generando controversia. Pero el interés creciente por la recepción magnética y las rápidas mejoras en las técnicas experimentales podrían llevar a resolver en los próximos años el misterio de este sentido insólito.

EL IMPULSO DE MIGRAR

Las pruebas de que los animales emplean a veces campos magnéticos para guiar su comportamiento surgieron hace medio siglo. Desde los años cincuenta se había advertido que, en otoño, los petirrojos europeos enjaulados parecían querer escapar hacia el sur (la dirección hacia la que suelen migrar), aunque carecieran de pistas visuales que les señalaran ese rumbo. Después, a mediados de la década de los sesenta, Wolfgang Wiltschko, estudiante de biología de la Universidad Goethe en Fráncfort, demostró que si colocaba bobinas electromagnéticas alrededor de la jaula podía engañar a los pájaros, que intentaban salir volando en una dirección equivocada. Se trataba tal vez de la primera prueba de la existencia de un sentido magnético. La reacción, como cabía esperar, fue de escepticismo. «Cuando descubrí que el campo magnético influía en la orientación de los petirrojos, casi nadie lo creyó», dice Wiltschko, quien hace poco se jubiló de su puesto de profesor en la Universidad Goethe.

Poco después de su hallazgo, Wiltschko conoció a su futura esposa y colaboradora científica, Roswitha. Desde entonces, la pareja ha estudiado la detección magnética aviar, sobre todo en petirrojos, que capturan con redes cerca de su laboratorio. Empezaron a publicar los resultados de sus investigaciones en 1972, cuando revelaron que los petirrojos no solo eran sensibles a la dirección geográfica del norte magnético, sino también a la inclinación del campo magnético de la Tierra en relación al plano horizontal.

La inclinación del campo geomagnético varía continuamente de un polo a otro. En el polo sur magnético señala directamente hacia arriba, mientras que en el norte lo hace hacia abajo; a lo largo del «ecuador magnético», el campo es horizontal. Una brújula ordinaria tiene que equilibrar su aguja horizontalmente, de manera que no puede medir la inclinación del campo, al responder tan solo a su componente lateral. Las aves (y también otros animales) sí presentan tal capacidad, y tal vez utilizan la inclinación para estimar de forma aproximada su distancia a los polos magnéticos.

Las variaciones en el campo de la Tierra no se limitan a los cambios de inclinación de un polo al otro. Los minerales magnéticos de la corteza terrestre producen anomalías locales tanto en dirección como en intensidad. Algunos animales (en especial las tortugas marinas) parecen poseer un mapa mental de dichas anomalías, información que les ayuda a saber no solo dónde está el norte, sino también su propia posición en relación a su destino. Kenneth J. Lohmann, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, y sus colaboradores han comprobado que las tortugas marinas tienden a responder a campos magnéticos artificiales que simulan las condiciones de distintas posiciones a lo largo de sus rutas de migración. Las tortugas intentan nadar en la dirección que las llevaría a su destino a partir de tales posiciones. Un sentido magnético semejante probablemente implica detectar no solo las anomalías de inclinación del campo, sino también las variaciones de su intensidad.

Algunos piensan que las aves poseen asimismo un sentido de mapa magnético, además de la orientación magnética simple. Pero Anna Gagliardo, experta en el olfato de las aves de la Universidad de Pisa, apunta a la escasez de pruebas al respecto. Y parece que las aves encuentran igualmente su camino con otros sentidos. En cuarenta años de experimentos, ninguna manipulación magnética ha impedido que las palomas mensajeras regresen a su palomar. Pero la investigadora advierte que las aves se pierden si se las priva de su sentido del olfato mediante la extirpación quirúrgica de los nervios olfativos. Además, añade, las

EN SÍNTESIS

Docenas de especies animales, desde hormigas hasta ballenas, poseen la capacidad de detectar el campo geomagnético y de usarlo para orientarse en sus desplazamientos.

Después de algunos intentos fallidos, los investigadores podrían haber localizado los órganos de este sentido magnético y empiezan a entender el fundamento físico que lo sustenta.

Algunos animales pueden servirse de partículas microscópicas magnéticas para detectar campos magnéticos; otros podrían aprovechar los efectos cuánticos sobre determinados pigmentos en los ojos.

palomas mensajeras criadas en aviarios que solo se abren hacia arriba (de modo que las aves no pueden reconocer la procedencia de los olores del ambiente) son incapaces de orientarse. Así, a pesar de la solidez de las pruebas sobre la capacidad de las aves de distinguir entre el norte y el sur magnéticos, Gagliardo duda de que su sentido magnético les sirva para mucho más.

Sin embargo, numerosos expertos creen ahora que las aves poseen dos sentidos magnéticos, cada uno optimizado para un uso concreto: un sentido de brújula para la dirección del campo y un «magnetómetro» para la intensidad. Otras investigaciones apuntan a la existencia de uno u otro en una misma especie, pero no de ambos a la vez. Tal discordancia de opiniones se debe a la enorme dificultad que entraña identificar los efectos del magnetismo en el comportamiento, en parte porque las aves y otros animales se sirven de distintos datos para orientarse en sus desplazamientos: emplean el sol, las estrellas y la luna; reconocen hitos sobre el terreno y la dirección principal del oleaje en el mar, y recuerdan olores. Los animales se orientan gracias a múltiples sentidos, señala Michael Winklhofer, geofísico de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich. «Utilizan todas las señales de que disponen. Cuando una les resulta dudosa, emplean otra más fiable». [*Véase* «Navegación animal», por M. L. Fanjul y Aldi de Oyarzábal; Investigación y Ciencia, diciembre de 2007]

Por desgracia, incluso los resultados más robustos de experimentos bien diseñados dan lugar a menudo a interpretaciones diversas. Según una de las principales observaciones de los Wiltschko, el sentido de brújula de los petirrojos no funcionaba en la oscuridad: necesitaba luz con un componente azul, o de longitud de onda corta. Sus hallazgos se obtuvieron en condiciones de laboratorio, lo que ayudaba a distinguir unos datos de otros pero los hacía algo artificiales. Pero en un estudio fundamental de 2004, Henrik Mouritsen, de la Universidad de Oldenburg, y sus colaboradores encontraron pruebas de la interacción luz-brújula en la naturaleza. Demostraron que los zorzales que volaban de noche recalibraban su sentido magnético cada día a la puesta del sol.

Para el experimento, el equipo de Mouritsen capturó docenas de zorzales en el centro de Illinois y los equipó con radiotransmisores. Al atardecer sometieron a 18 de los pájaros a un campo magnético que simulaba el de la Tierra, pero que señalaba al este en lugar del norte. Cuando hubo anochecido, abrieron las jaulas para liberar los pájaros, a los que persiguieron con un automóvil provisto de una gran antena en el techo. Mientras que las aves sin tratar continuaron su migración al norte, hacia Wisconsin, los 18 pájaros que habían sido sometidos al falso campo magnético se dirigieron al oeste, hacia Iowa o Missouri. Sin embargo, en las noches siguientes estas aves corrigieron su ruta y se dirigieron de nuevo al norte.

Aunque los resultados indicaban que los zorzales restablecían su norte magnético al atardecer, las interpretaciones sobre la influencia de la luz en dicho proceso resultaron diversas. Cabía la posibilidad de que las aves poseyeran una brújula interna que solo funcionaría en presencia de luz, como habían concluido los Wiltschko. Pero había otra explicación verosímil: las aves habrían usado el sol solo como punto de referencia para calibrar una brújula que no necesitaba luz para funcionar. En realidad, habrían seguido empleando su brújula durante toda la noche.

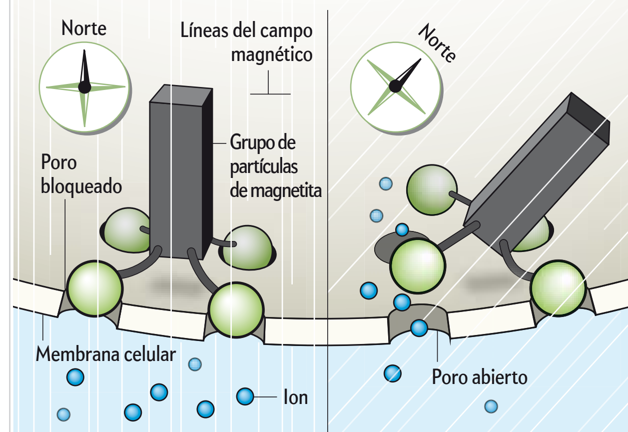
Queda claro que los experimentos de comportamiento por sí solos no permiten zanjar la cuestión en uno u otro sentido. En última instancia, será necesario localizar y estudiar más directamente los órganos sensoriales.

JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); FUENTE: «THE MAGNETIC SENSE AND ITS USE IN LONG-DISTANCE NAVIGATION BY ANIMALS», POR MICHAEL M. WALKER, TODD E. DENNIS Y JOSEPH L. KIRSCHVINK, EN *CURRENT OPINION IN NEUROBIOLOGY*, VOL. 12, N.º 6; DICIEMBRE DE 2002

PRIMERA HIPÓTESIS

Los peces lo hacen, las aves quizá

Algunos sospechan que el sentido magnético de los animales se asemeja en gran parte al que hay en el hocico de la trucha arcoíris. En el pez, grupos de partículas de magnetita (una forma de óxido de hierro) en células sensoriales responden a un cambio en la dirección del campo geomagnético (en relación a la cabeza del pez) mediante la apertura de canales en la membrana celular (*derecha*). El consiguiente paso de iones a través de la membrana inicia una señal que se transmite a lo largo de un nervio hasta alcanzar el cerebro.



PISTAS HERRUMBROSAS

Buscar órganos sensibles al magnetismo representa la peor pesadilla de un anatomista. Los receptores podrían consistir en células aisladas situadas en cualquier lugar del cuerpo. Podrían contener partículas magnéticas microscópicas (que funcionaran como una aguja de brújula) que, al analizarlas, resultarían difíciles de distinguir de posibles contaminantes en los tejidos de los ejemplares. El mecanismo que se busca ha de cumplir asimismo unas condiciones estrictas; en particular, debe reaccionar a campos tan tenues como el de la Tierra, y ha de reconocer la señal magnética entre el ruido de las vibraciones moleculares naturales, tarea de especial dificultad para una estructura microscópica. Hasta ahora, el único mecanismo que se ha identificado y explicado de manera inequívoca se halla en bacterias.

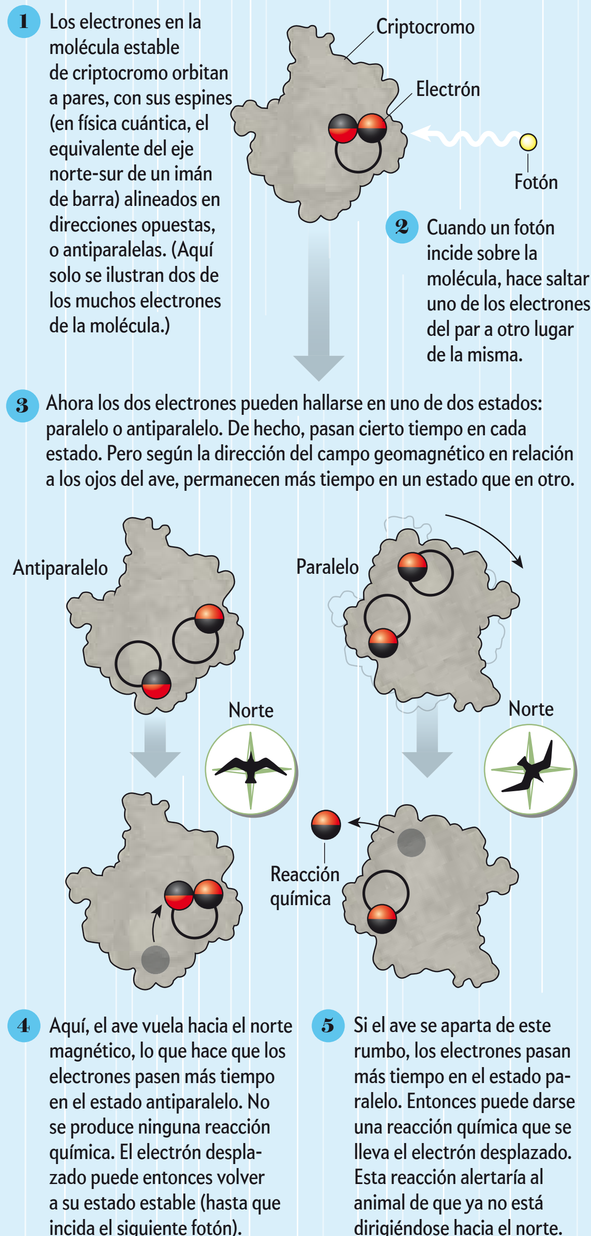
En latitudes con una elevada inclinación del campo geomagnético, ciertas bacterias utilizan ese dato como una indicación de la gravedad. Pueden reconocer así dónde se sitúa «abajo» y nadar hacia los fondos marinos fangosos, su hábitat preferido. En el decenio de los setenta, se demostró que dichas bacterias contenían sartas de partículas microscópicas de magnetita (una forma de óxido de hierro con propiedades magnéticas) que se alineaban entre sí y con el campo, y que en el proceso orientaban a todo el organismo en la dirección adecuada.

Las bacterias ofrecían un paradigma natural para intentar comprender la percepción del magnetismo. En los años ochenta, el geobiólogo Joseph L. Kirschvink, en la actualidad en el Instituto de Tecnología de California, y otros plantearon la posible existencia en todo el reino animal de estructuras simila-

SEGUNDA HIPÓTESIS

Ojos magnéticos

Algunos consideran que la clave del sentido magnético de las aves reside en el criptocromo, una proteína presente en la retina. Determinadas células del ojo detectarían la dirección en que se halla el norte por la velocidad de una reacción química, que se haría más rápida o más lenta en función de la dirección del campo magnético de la Tierra. La reacción se iniciaría al incidir un fotón sobre una molécula de criptocromo, lo que provocaría la separación de los dos electrones que normalmente orbitan apareados. Ello llevaría a que la célula emitiera una señal al cerebro que permitiría al animal conocer la dirección del campo.



Muchos de estos detalles todavía se desconocen, entre ellos, la reacción química que se produce y el modo en que esta se traduce en una señal al cerebro del ave.

JEN CHRISTIANSEN

res basadas en la magnetita. Empezaron a buscar dichas partículas en animales sensibles al magnetismo terrestre.

A principios de la década de 2000, un equipo que incluía a Winklhofer, Wolfgang Wiltschko y el matrimonio Gerta y Günther Fleissner, de la Universidad Goethe, empleó técnicas avanzadas de obtención de imágenes y reveló unas estructuras intrigantes revestidas de partículas de magnetita en palomas mensajeras. Hallaron esas estructuras en la piel del pico superior de las aves. Las partículas magnéticas eran muy pequeñas (unos pocos nanómetros), por lo que deberían presentar un movimiento aleatorio importante en comparación con su tamaño. Según Winklhofer, semejante ruido habría impedido que las partículas interpretaran la intensidad del campo magnético, pero sí podrían detectar su dirección, igual que lo hace una brújula. Resulta fascinante que las estructuras se hallen en regiones con gran densidad de terminaciones nerviosas, hecho que cabría esperar de supuestos receptores integrados en el sistema nervioso.

Sin embargo, solo unas pocas partículas parecían contener magnetita; las otras eran de un material muy parecido, la maghemita, de menor fuerza magnética. Aun así, los investigadores pensaron que se hallaban sobre la pista correcta.

En un artículo posterior, los Fleissner y sus colaboradores propusieron un modelo para explicar el modo en que una estructura compuesta de maghemita funcionaría como una brújula. Sugirieron que tales estructuras se magnetizarían temporalmente y amplificarían el campo geomagnético a su alrededor al encauzarlo hacia las partículas de magnetita.

Sin embargo, Winklhofer no compartía las ideas de sus antiguos colaboradores y, con Kirschvink, publicó una refutación a su hipótesis. Los dos investigadores citaban pruebas de que la maghemita del estudio era amorfa, es decir, carecía de una ordenación cristalina. Según Winklhofer, dichos materiales amorfos funcionan como imanes muy débiles, demasiado débiles para producir el resultado que se atribuye a las partículas observadas en las aves. Otros expertos ponen en duda que las terminaciones nerviosas se localicen exactamente en las partículas magnéticas. Después de todo, las estructuras descritas en el pico de las palomas mensajeras podrían no tener nada que ver con la percepción magnética, concluye Winklhofer.

Otra razón a tener en cuenta es la ubicuidad de la magnetita y otras partículas magnéticas en el ambiente. «Incluso el polvo del laboratorio contiene materiales magnéticos», apunta Winklhofer. Los anatomistas han de utilizar escalpelos de cerámica para evitar introducir fragmentos metálicos en los tejidos que extraen de los animales. Pero si las partículas penetran en el cuerpo como contaminantes pueden ser captadas por los glóbulos blancos de la sangre, que después aparecerían en el microscopio con el aspecto de posibles células sensoriales.

A pesar de las dificultades particulares que plantea el supuesto receptor magnético en las palomas mensajeras, Winklhofer y Kirschvink siguen defendiendo con firmeza la hipótesis de la magnetita. Dirigen la atención hacia la mejor prueba que existe sobre un tal órgano: las células que tapizan la abertura nasal de la trucha arco iris. Michael M. Walker, de la Universidad de Auckland, y sus colaboradores han estudiado esas células desde que las descubrieron en 1997. Han demostrado que presentan una respuesta electrofisiológica a campos magnéticos y envían una señal al cerebro.

Kirschvink dirige ahora un proyecto plurianual en el que participan diferentes laboratorios para caracterizar la estructura y comportamiento de los supuestos receptores magnéticos

en la trucha. Sospecha que las partículas de magnetita están contenidas en orgánulos que se unen directamente a las membranas de neuronas especializadas. Cada una de dichas células constituiría un órgano microscópico sensible al magnetismo. Cuando un campo magnético hace adoptar una nueva orientación a los orgánulos, se produce una liberación de iones que activan las neuronas, las cuales informan al cerebro en qué dirección debe nadar el pez. Según Kirschvink, los que han estado estudiando el pico de las palomas deberían fijarse en el ejemplo de la trucha y buscar en el olfato de las aves.

SEÑALES CRÍPTICAS

La magnetita no es la única posibilidad que se debate: a muchos les parece asimismo verosímil un mecanismo basado en la física cuántica. Klaus Schulten, biofísico teórico que en la actualidad trabaja en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, observó en el decenio de los setenta que las reacciones químicas afectadas por campos magnéticos podían proporcionar la base física de un sentido magnético. Las reacciones implicadas se iniciarían cuando los fotones incidieran en las moléculas pigmentarias adecuadas, lo que provocaría la formación de los llamados radicales libres. La necesidad de fotones explicaría la conexión entre la luz solar y la brújula interna descrita por los biólogos. Sin embargo, en aquellos días esa idea parecía extravagante, y Schulten no aclaraba el modo en que la señal llegaba al cerebro.

Después, a finales de los años noventa, los bioquímicos descubrieron un pigmento proteico, el criptocromo, primero en las plantas y más tarde en la retina de los mamíferos (humanos incluidos). En los mamíferos presentaba diversas variantes y ayudaba a los animales a ajustar sus ritmos circadianos [*véase* «Un órgano oculto en los ojos», por Ignacio Provencio; Investigación y Ciencia, julio de 2011]. Schulten, junto con sus colegas Salih Adem y Thorsten Ritz, biofísico que hoy trabaja en la Universidad de California en Irvine, sugirieron que el criptocromo poseía las cualidades apropiadas para intervenir en un sentido de la orientación. Determinadas células de la retina podrían utilizar la formación en ella de radicales libres para detectar la dirección del campo magnético de la Tierra.

Los experimentos de laboratorio habían demostrado que cuando el criptocromo absorbe un fotón en la parte azul del espectro, la energía del fotón hace saltar un electrón de una parte de la molécula a otra. Para que una molécula sea químicamente estable, sus electrones deben orbitar apareados, pero en el criptocromo el desplazamiento provoca que dos electrones de un par pasen a orbitar en solitario. Ahora bien, los dos electrones, o par radical, inician un complicado «paso a dos» dictado por sus espines respectivos. El espín es el análogo en física cuántica del eje magnético de un imán de barra. Cada espín de los electrones interacciona con el campo geomagnético y con los espines de los núcleos atómicos; en conjunto, las interacciones hacen que el eje del espín del electrón realice un movimiento de precesión semejante al de una peonza que gira. En un par radical, el espín de cada electrón está asimismo influido por el de su homólogo.

En algunos momentos de la actividad de los electrones emparejados, sus espines apuntan en la misma dirección, mientras que en otros lo hacen en direcciones opuestas. De manera crucial, un campo magnético externo, como el de la Tierra, modifica la duración relativa del tiempo que los electrones permanecen en cada alineación. El efecto de un campo externo sobre las características químicas del criptocromo se produce del siguiente modo: determinadas reacciones químicas solo pueden tener lugar cuando los espines son paralelos. Así, si un campo mantiene los espines paralelos durante más tiempo, las reacciones se acelerarán.

La velocidad de una reacción sensible al espín podría constituir la señal química para que una neurona sensorial se activara y enviara un mensaje a lo largo de un nervio hasta el centro cerebral responsable de una conducta dirigida por el magnetismo. Lamentablemente, aunque el principio general es bien conocido, en el caso del criptocromo se ignora la reacción química relevante o el modo en que una variación de su velocidad provoca la excitación de una neurona. Aun así, en el último decenio se han aportado nuevas pruebas al respecto.

La precesión del espín no solo es sensible a los campos estáticos como el geomagnético, sino también a los que varían rápidamente con el tiempo, como las ondas de radio. En 2004, Ritz se unió al equipo de los Wiltschko y demostró que esas ondas desbarataban la brújula interna de las aves. La perturbación se daba solo a determinadas longitudes de onda, como sucedería si las ondas interfirieran con la danza de los pares radicales. «Desde una perspectiva física, hasta ahora es la mejor prueba del mecanismo de los pares radicales», comenta Ritz.

Más tarde, en 2009, un equipo dirigido por Mouritsen descubrió que las aves con lesiones en un centro cerebral relacionado con la visión sufrían importantes alteraciones en la orientación magnética. Y en 2010, un estudio con petirrojos europeos y pollos dirigido por Christine Niessner, de la Universidad Goethe, halló que el criptocromo se producía en abundancia en la retina de las aves, y de modo más específico en sus conos, las células visuales sensibles a la radiación ultravioleta. Precisamente los biólogos esperarían que residiera allí, dado que la formación de pares radicales requiere luz.

Sin embargo, el caso no está cerrado. La mayoría de los resultados todavía no han sido reproducidos de manera independiente. Como sucede con la magnetita, algunas de las pruebas obtenidas hasta hoy no son tan sólidas como parecen. El propio Ritz advierte que las ondas de radio inducen campos eléctricos que podrían desbaratar los procesos biológicos de maneras impredecibles. Se sabe que las ondas interfieren con los receptores de neurotransmisores que se activan en los centros de placer, con lo que podrían desorientar de modo indirecto a los animales sin que estos perdieran la capacidad de sentir los campos magnéticos.

Peter J. Hore, físico de la Universidad de Oxford, añade que la sensibilidad de las aves a las ondas de radio parece demasiado elevada para ser cierta: un campo con una intensidad de solo 1/2000 de la del campo geomagnético basta para desbaratar su sentido magnético.

Una confusión similar envuelve los estudios sobre el criptocromo en las moscas del vinagre. En 2008, Reppert y sus colaboradores demostraron que se podía adiestrar a las moscas para que siguieran campos magnéticos que les conducían a una recompensa azucarada. Pero observaron que las moscas mutantes sin el gen del criptocromo, incapaces de producir la proteína, no podían ser adiestradas.

Sin embargo, los insectos habían sido expuestos a campos diez veces superiores a los del campo geomagnético. Y puesto que los experimentadores sabían cuándo se hallaban activados o desactivados los campos artificiales, sin darse cuenta pudieron haber dado pistas a los insectos, señala Kirschvink.

En suma, indica Hore, aunque se han ido acumulando pruebas en apoyo de la hipótesis del par radical, el fenómeno no se ha aclarado del todo. Faltan varias piezas del rompecabezas, em-

pezando por los detalles del mecanismo. En última instancia, será necesario identificar una respuesta electrofisiológica (neuronas que se activan en respuesta a campos magnéticos) para poder afirmar que se ha descubierto la ubicación del nuevo sentido. La electrofisiología constituye el criterio de referencia de la biología sensorial, apunta Ritz: «Así demostramos cómo funcionaba la visión».

De modo sorprendente, en junio de 2011 Reppert y sus colaboradores revelaron que las moscas del vinagre en las que se había sustituido el gen del criptocromo por el gen correspondiente en el genoma humano conservaban la capacidad de orientarse según el campo magnético. El descubrimiento reavivó la especulación de que los humanos podrían albergar también un sentido magnético, aunque las pruebas al respecto son escasas. Los experimentos que realizó Robin R. Baker, de la Universidad de Manchester, al final de la década de los setenta mostraban que los humanos poseían cierta capacidad de orientarse según el campo magnético, pero los intentos de reproducir tales resultados fracasaron.

REUNIR TODAS LAS PRUEBAS

La mayoría de los expertos han abandonado otras explicaciones para el sentido magnético y creen verosímil al menos una de las dos hipótesis principales. Un caso aparte sería el sentido magnético de las mantas y los tiburones, que algunos creen que representaría una ventaja añadida a la extraña sensibilidad de esos animales a los campos eléctricos. Dichos peces poseen en la piel canales microscópicos que conducen la electricidad y que utilizan para sentir voltajes muy débiles, del orden de cinco milmillonésimas de voltio [*véase* «Electrosensibilidad en los tiburones», de R. Douglas Fields; Investigación y Ciencia, octubre de 2007]. Puesto que los campos magnéticos inducen un voltaje sobre los conductores en movimiento, un pez podría captar el campo geomagnético con tan solo moverse a izquierda y derecha cuando nada.

Incluso si se llegan a zanjar las controversias, todavía resultará difícil explicar la sorprendente capacidad de orientación de algunos animales migradores, como las ballenas jorobadas, que nadan cientos de kilómetros en el océano abierto sin desviarse en más de un grado del rumbo inicialmente adoptado.

Pero muchos confían en que pronto se revelarán los mecanismos de la recepción magnética. Las técnicas experimentales han avanzado de forma espectacular. Hoy es posible realizar el seguimiento de incluso pequeñas aves, los métodos de obtención de imágenes de estructuras anatómicas microscópicas se han hecho más precisos y los científicos de disciplinas diversas unen sus esfuerzos. Una vez el misterio se haya resuelto, algunos mirarán hacia atrás, hacia estos años, con añoranza, dice Ritz: «No siempre existe la oportunidad de descubrir un nuevo sentido».

PARA SABER MÁS

Structure and function of the vertebrate magnetic sense. Michael M. Walker *et al.* en *Nature*, vol. 390, págs. 371-376, 27 de noviembre de 1997.

A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. Thorsten Ritz, Salih Adem y Klaus Schulten en *Biophysical Journal*, vol. 78, n.º 2, págs. 707-718, febrero de 2000.

Migrating songbirds recalibrate their magnetic compass daily from twilight cues. William W. Cochran, Henrik Mouritsen y Martin Wikelski en *Science*, vol. 304, págs. 405-408, 16 de abril de 2004.

Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. Sabine Begall, Jaroslav Červený, Julia Neef, Oldřich Vojtěch y Hynek Burda en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 36, págs. 13.451-13.455, 9 de septiembre de 2008.

Magnetoreception. Suplemento monográfico de *Interface Focus: Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, n.º 2, 6 de abril de 2010.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
   Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
   Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
   Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
   Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
   Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
   Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
   El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
   Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
   Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
    La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos	
España: 2,80€	Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA	
España: 7,00€	Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

J. Cameron Monroe es arqueólogo en la Universidad de California en Santa Cruz. Investiga las transformaciones políticas, económicas y culturales que África Occidental sufrió durante la época del comercio de esclavos y es director del proyecto de investigación que su universidad lleva a cabo en la meseta de Abomey, en Benín.



ARQUEOLOGÍA

El urbanismo en la costa de los Esclavos

Nuevos datos arqueológicos revelan la estructura y funcionamiento de las ciudades africanas entre los siglos XVII y XIX

J. Cameron Monroe

Hasta hace bien poco, se consideraba que el África subsahariana carecía de una historia urbana con raíces sólidas. Dado que numerosas comunidades africanas no encajaban bien con el modelo de ciudad que albergaban los académicos del siglo XX, la gran extensión de las urbes africanas precoloniales se atribuyó a la influencia de Oriente Medio y Europa durante el segundo milenio. La ciudad se entendía entonces como un asentamiento con una gran población, arquitectura monumental y una clase educada garante de la religión, las artes y el gobierno. Las comunidades africanas que no cumplían con estas condiciones se consideraron, pues, meras prolongaciones rurales, y las que sí lo hacían se interpretaron como beneficiarias del estímulo cultural exterior.

A pesar del influjo que esa idea ha ejercido en nuestra percepción del África subsahariana, las pruebas acumuladas durante las últimas décadas están disipando el mito de una África precolonial carente de urbes. El modelo funcional de ciudad nos ha obligado a reconsiderar nuestra noción de núcleo urbano. Si bien es cierto que las ciudades se distinguen de los asentamientos rurales, no lo es menos que entre ambos existe una estrecha integración: una ciudad proporciona servicios especializados a un territorio más extenso. Por tanto, la cuestión clave no versa sobre lo que la ciudad *es*, sino sobre lo que *hace* por las comunidades rurales de su área de influencia.

El modelo funcional ha resultado de gran utilidad en el estudio de la evolución de los asentamientos urbanos en todo el continente. Los estudios realizados durante los años ochenta y noventa del siglo pasado por Susan y Roderick McIntosh, de las universidades Rice y Yale, revelaron que las comunidades del delta interior del Níger, en el actual Mali, comenzaron su transición hacia una vida urbana durante el primer milenio de nuestra era, mucho antes de que la influencia de Europa o de Oriente Próximo fuera apreciable. Por otra parte, las investigaciones arqueológicas sobre las civilizaciones suahili (en África Oriental) y zimbabuense (al sur del continente) han hallado ciudades que, si bien florecieron a principios del segundo milenio gracias a la actividad comercial en el Índico, contaban con profundas raíces locales. Tales descubrimientos rechazan la idea de que la cultura urbana en África solo se basase en el estímulo cultural exterior.

No obstante la antigüedad de la tradición urbana en toda el África subsahariana, las investigaciones dejan también patente la influencia exterior sobre la organización de sus ciudades. La

EN SÍNTESIS

El comercio transatlántico y el tráfico de esclavos de la época colonial trajeron consigo profundos cambios demográficos, políticos y sociales para los pueblos de África Occidental.

Los monarcas de la zona aprovecharon la circulación de bienes europeos y la exportación de cautivos para establecer sus estrategias de dominio sobre la población y sobre los reinos vecinos.

La arqueología del paisaje está ayudando entender la influencia que las actividades comerciales de la época ejercieron sobre las dinámicas que cohesionaban la urbe y el medio rural en la región.

Era Atlántica, que se extendió desde el siglo XVII al XIX, trajo consigo una intensa integración del comercio mundial. Durante la segunda mitad del siglo XVII, cuando el tráfico de esclavos comenzó a dominar el comercio a través del Atlántico, las comunidades urbanas del occidente africano experimentaron profundos cambios. Las capitales se expandieron con rapidez, nacieron ciudades en la costa y en el interior, y la población acudió en tropel a las fortalezas costeras controladas por los europeos. Las incursiones para capturar esclavos despoblaron por completo algunas zonas; en otras, sus habitantes huyeron del conflicto hacia comunidades fortificadas en regiones montañosas. En general, este período se caracterizó por una gran conmoción demográfica que acarreó consecuencias de calado para la vida de los nativos.

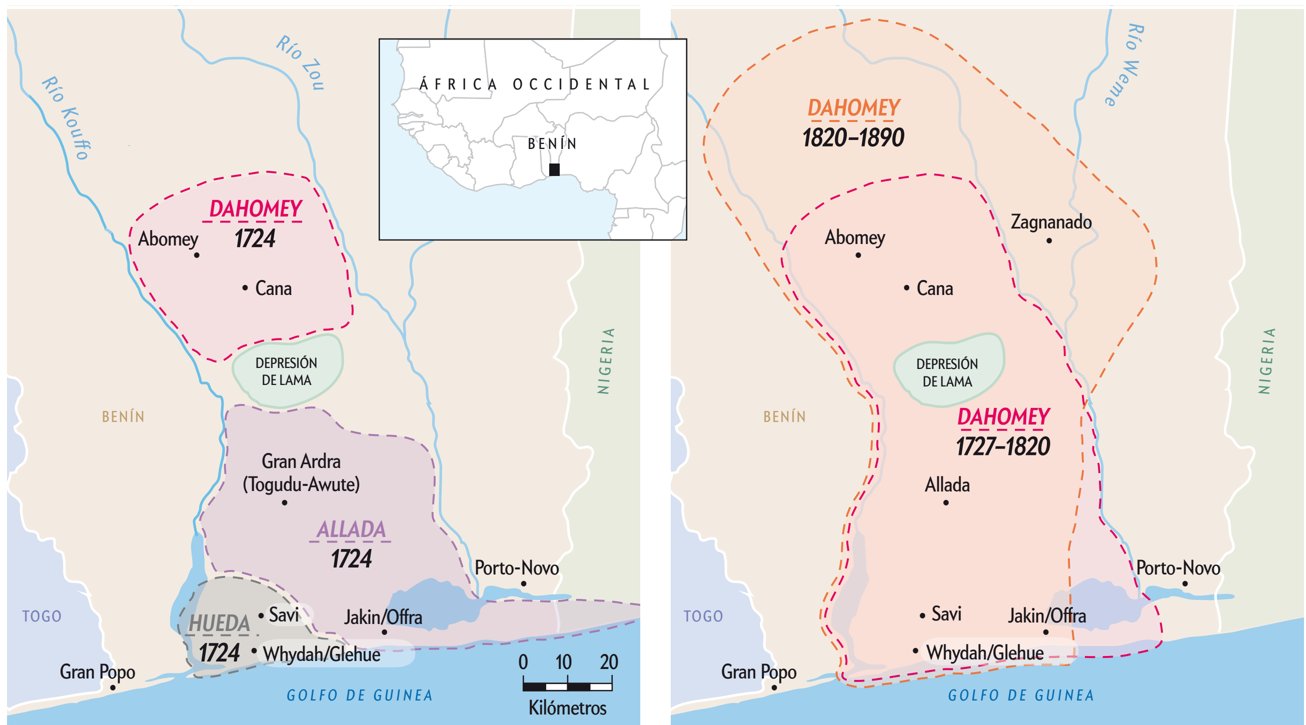
La arqueología está aportando nuevas perspectivas sobre la transformación urbana en África Occidental durante la Era Atlántica. A fin de analizar los efectos sociales y culturales que el comercio de bienes exóticos ejerció sobre la vida de sus pobladores, se han excavado numerosos yacimientos a lo largo de la costa y en el interior. Cada vez más, sin embargo, la óptica que proporciona la arqueología del paisaje (un enfoque basado en las características generales de toda la región) está ayudando a entender la relación entre las actividades comerciales de la época y las dinámicas que cohesionaban la urbe y el medio rural. Para la arqueología del paisaje, el principal elemento de análisis no son los yacimientos aislados, sino las pautas que gobernaban la distribución de asentamientos y las características culturales de toda la zona. Las ventajas de este enfoque quedan patentes, sobre todo, en el creciente conjunto de estudios sobre dos reinos del África Occidental cuyos destinos guardaron una estrecha relación: Hueda y Dahomey. Ambos fueron zonas de intensa actividad comercial y agitación política durante la era del tráfico transatlántico de esclavos.

La costa de los Esclavos: Este mapa de 1743, publicado por la editorial alemana Homann Heirs, retrata la vida en la costa occidental africana durante la era del tráfico de esclavos. En la parte inferior se representan algunas actividades comerciales de la época, así como el rey y la reina de Hueda. La arqueología del paisaje permite explorar los cambios que acusó la región: las ciudades de la zona se adaptaron a la rápida expansión del comercio de esclavos en los siglos XVII y XVIII, y a una economía agrícola de exportación en el siglo XIX.

CORTESÍA DE GEOGRAPHICUS RARE ANTIQUE MAPS, WWW.GEOGRAPHICUS.COM

ASENTAMIENTOS Y COMERCIO

Durante la Era Atlántica, la costa de los Esclavos se extendía desde la desembocadura del río Volta, en Ghana, hasta el canal



Dahomey, Allada y Hueda: La imagen muestra las fronteras de estos reinos y sus cambios entre los siglos XVII y XIX. Resulta notoria la expansión de Dahomey hacia la costa y hacia el interior.

ADAPTADO DE: *THE SLAVE COAST OF WEST AFRICA, 1570-1750*, DE ROBIN LAW, 1991; Y: *SLAVERY, COLONIALISM AND ECONOMIC GROWTH IN DAHOMEY, 1640-1960*, PATRICK MANNING, 1982.

de Lagos, en Nigeria: unos 300 kilómetros de costa y tierras aledañas. El área, que hoy comprende el sudeste de Ghana, las zonas meridionales de Togo y Benín, y el sudoeste de Nigeria, se ve atravesada por el corredor de Dahomey, un territorio singular desde el punto de vista ecológico. Pertenece a la zona de transición de Guinea, caracterizada por un mosaico de bosque y sabana que interrumpe el cinturón de selva tropical que bordea la costa occidental africana. La región se encuentra salpicada por lagunas costeras y grandes desembocaduras de ríos, los cuales sirvieron como verdaderas arterias comerciales y culturales de la zona. Las mismas desembocaduras atraviesan una serie de mesetas que, por gozar de temperaturas más bajas y mantenerse alejadas de las enfermedades propias de las cuencas fluviales, propiciaban los asentamientos. Todo ello fomentó el desarrollo de comunidades agrícolas y pesqueras, el comercio, los mercados y la centralización política: las bases, en definitiva, para las grandes civilizaciones urbanas con las que se encontraron los europeos. El terreno, relativamente despejado, supuso otro atractivo para los comerciantes del Viejo Continente. En el siglo XVI, en su búsqueda de mano de obra esclava, los mercaderes portugueses empezaron a comerciar con las entidades políticas de la zona.

En los albores de la Era Atlántica, varios reinos se extendían a lo largo de la región. Isaac Adeagbo Akinjogbin, de la Universidad Obafemi Awolowo, en Nigeria, estimó que en este período habrían llegado a coexistir hasta 15 reinos en el corredor de Dahomey. Según fuentes etnográficas e históricas, numerosos monarcas cruzaron la región en una serie de migraciones desde los núcleos urbanos yoruba de Ile-Ife, Oyo y, más tarde, desde Ketu. A su paso, sometieron a las comunidades locales y establecieron reinos centralizados. Durante el siglo XVII y principios del XVIII, cuando se extendió el tráfico de esclavos para satisfacer la demanda europea de mano de obra en las plantaciones del Nuevo Mundo, las fuentes históricas identifican dos grandes centros costeros de comercio de esclavos: Allada y su reino subordinado, Hueda, ambos en la actual República de Benín.

Fundada en algún momento del siglo XVI, Allada se erigía como la entidad política dominante en la región. Su expansión se debió al comercio costero con otros reinos de la zona boscosa, sobre todo con el de Benín, al sur de la Nigeria actual. A mediados del siglo XVI, los portugueses ya desarrollaban una intensa actividad comercial en Grand Ardra, la capital del reino. Con unos 30.000 habitantes, se trataba de una ciudad de tamaño considerable; Allada, en conjunto, contaba con unas 200.000 almas. En 1668, el médico holandés Olfert Dapper hablaba en su *Descripción de África* acerca de la presencia de «ciudades y pueblos en gran número» en los alrededores rurales de Grand Ardra. En el siglo XVII, Allada se convirtió en el principal reino de la región; exigía tributo a sus vecinos y legitimaba esta práctica por medio de distintas obligaciones rituales.

En los registros y las descripciones de la época destaca también Hueda, una de las monarquías dominadas por Allada. Reino menor durante la mayor parte del siglo XVII, pasó a formar parte de los registros históricos en 1671 gracias a la fundación de un pabellón de comercio en Savi, su capital. Al igual que Allada, era un reino populoso que probablemente superaba los 100.000 habitantes, 30.000 de ellos en Savi. En el siglo XVIII, el traficante de esclavos inglés Robert Norris escribió:

> «Sabee, en aquella época metrópoli del reino, residencia del monarca y sede del comercio, abarcaba una circunferencia de más de seis kilómetros. Las viviendas contaban con paredes de barro y techado de paja, y las fábricas de los comerciantes europeos, espaciosas y aireadas, se hallaban distribuidas en cómodos apartamentos y rodeadas por una gran galería abierta en balconadas. El gentío de la ciudad era tal que resultaba imposible pasear por sus

calles sin enorme dificultad. Había mercado todos los días; en él se exponían a la venta todo tipo de productos europeos y africanos, así como abundantes provisiones de toda clase [...] Las llanuras estaban adornadas con incontables aldeas y pueblos, cada uno de los cuales se encontraba circundado por un muro de barro y situado bien a la vista de toda la comarca. Todo este conjunto se unía para formar el más pintoresco paisaje imaginable, libre de toda montaña o colina.»

Esas ciudades albergaban los principales mercados de sus respectivos territorios. En su apogeo, los días de mercado de Savi llegaban a congregar hasta 5000 personas. Las comunidades rurales acudían a Savi y Grand Ardra cada cuatro días (la semana de mercado) para vender sal, textiles, cestas, calabazas y cerámica, entre otros productos. Estas regiones se caracterizaban por una organización política basada en la diferenciación entre asentamientos, según la cual los centros urbanos actuaban como nexos políticos y económicos entre otros núcleos rurales menores. Las comunidades rurales y urbanas se hallaban, pues, integradas en lo tocante a la producción y distribución de los productos de uso cotidiano.

A pesar de los orígenes nativos y del carácter local de dichas ciudades, el comercio de esclavos ejerció una influencia cada vez mayor sobre la dinámica entre la urbe y el campo. Durante aquel período, los prisioneros, atrapados en redadas contra los vecinos más débiles, se convirtieron en el principal objeto del comercio. Hacia 1680, las exportaciones ascendían a unos 5000 cautivos al año, cifra que entre 1690 y 1720 llegó a alcanzar los 10.000 esclavos anuales. A cambio, se recibían sobre todo textiles y conchas de cauri (*Cypraea moneta*), originarias del océano Índico y empleadas allí como moneda. En los textos de la época se mencionan también otros artículos, como barras de hierro y bronce, abalorios, armas y bebidas alcohólicas. Asimismo, en los yacimientos contemporáneos se han documentado pipas de barro, recipientes de cerámica, botellas de alcohol y otras baratijas. En suma, la introducción de productos manufacturados europeos y asiáticos ejerció una enorme influencia sobre la región.

Aunque las fuentes históricas sugieren que algunos de esos artículos entraron en el circuito comercial de los mercados regionales, los productos de importación constituían, sobre todo, una fuente simbólica de poder para los monarcas, quienes los atesoraban con gran celo. Los relatos de la época describen ceremonias públicas, como coronaciones y rituales funerarios de reyes, en los que se exhibían grandes cantidades de artículos suntuarios y se distribuían entre el pueblo. El poder y prestigio reales se hallaban íntimamente ligados al éxito de esas ceremonias. Por un lado, la exposición pública de la riqueza acumulada gracias al comercio reforzaba el poder simbólico del rey; por otro, la distribución de bienes entre sus seguidores integraba a los súbditos en un sistema político estable. El control del acceso a la riqueza procedente del Atlántico se convirtió, por tanto, en un componente clave de las estrategias de los monarcas para instaurar el orden. Si bien los mercados locales cohesionaban económicamente la ciudad y el campo, fueron los artículos de

Savi: **En la capital del reino de Hueda, los monarcas trataron de controlar el acceso a los productos comerciales europeos durante el siglo XVII y principios del XVIII. A tal fin, los mercaderes debían residir en el recinto real (*derecha*). En las excavaciones (*abajo, a la derecha*) han aparecido artículos comerciales importados, como ladrillos holandeses y porcelana china (*abajo, a la izquierda*), si bien solo en las áreas públicas del complejo palaciego.**



Palacio (artículos comerciales europeos)
Viviendas (pocos o ningún artículo comercial europeo)
Zanjas (sugieren los límites del recinto real)
Recinto real de Savi
0 100 200
Metros

DE: *VOYAGES DU CHEVALIERS DES MARCHAIS EN GUINÉE, ISLES VOISINES, ET À CAYENNE, EN 1725-27*, DE JEAN-BAPTISTE LABAT, 1731 (*palacio de Savi*); ADAPTADO DE: «THE ARCHAEOLOGY OF AFRICAN-EUROPEAN INTERACTION: INVESTIGATING THE SOCIAL ROLES OF TRADE, TRADERS, AND THE USE OF SPACE IN THE SEVENTEENTH- AND EIGHTEENTH-CENTURY HUEDA KINGDOM, REPUBLIC OF BÉNIN», POR K. KELLY EN *WORLD ARCHAEOLOGY*, VOL. 28, PÁG. 351, 1997 (*excavaciones*); CORTESÍA DE NEIL NORMAN, COLEGIO UNIVERSITARIO WILLIAM Y MARY (*restos arqueológicos*)





Riqueza real: **Esta reproducción del siglo XVIII muestra la importancia que la élite de Dahomey otorgaba a la distribución de la riqueza material. La imagen representa una *xwetanu*, ceremonia anual de homenaje a los antepasados reales en la que se distribuían objetos valiosos y se sacrificaban prisioneros.**

DE: *THE HISTORY OF DAHOMEY*, DE ARCHIBALD DALZEL, 1793.

lujo los que aglutinaban a los dirigentes rurales con las dinastías reales de los núcleos urbanos.

Los productos comerciales gozaban de una gran demanda en Allada y Hueda, cuyos respectivos monarcas competían por acaparar esa nueva fuente de poder. Durante la mayor parte del siglo XVII y principios del XVIII, los sucesivos reyes de Allada buscaron monopolizar el acceso a dichos artículos, sobre todo por medio de redadas de esclavos contra los vecinos más débiles. Por temor a la competencia de sus rivales, los monarcas llegaron a instar a los mercaderes europeos a comerciar directamente con ellos antes que con cualquier otro en el reino. Sin embargo, cuando la demanda de esclavos en el Nuevo Mundo comenzó a tocar techo, hacia finales de siglo, Allada tuvo dificultades para mantener el monopolio, circunstancia que otras entidades políticas aprovecharon para participar del comercio. El ascenso del reino de Hueda fue producto de la pérdida de autoridad de Allada: en un momento de gran demanda de cautivos, su proximidad a los puertos otorgó a la élite de Hueda el acceso a vastas cantidades de riqueza proveniente del Atlántico. Ello desembocó en la aparición de una poderosa entidad política en torno a un complejo palaciego que, a menudo, operó contra los intereses de Allada, su cacique político.

Uno de los padres de la investigación arqueológica sobre la Era Atlántica en el sur de Benín ha sido Alexis B. A. Adandé, de la Universidad de Abomey-Calavi. En la década de los ochenta, comenzó las excavaciones y la investigación histórica oral en Togudo-Awute, la antigua Grand Ardra. Por lo demás, casi todo lo que sabemos sobre la forma en que el comercio moldeó la dinámica entre el campo y la ciudad se debe al Proyecto Arqueológico Savi, dirigido por Kenneth Kelly, de la Universidad de Carolina del Sur, y, más recientemente, por Neil Norman, del Colegio Universitario William y Mary. Dos décadas de investigación arqueológica en Savi han servido para estudiar el rápido crecimiento y la pronta desaparición del reino de Hueda como resultado de las presiones del comercio atlántico.

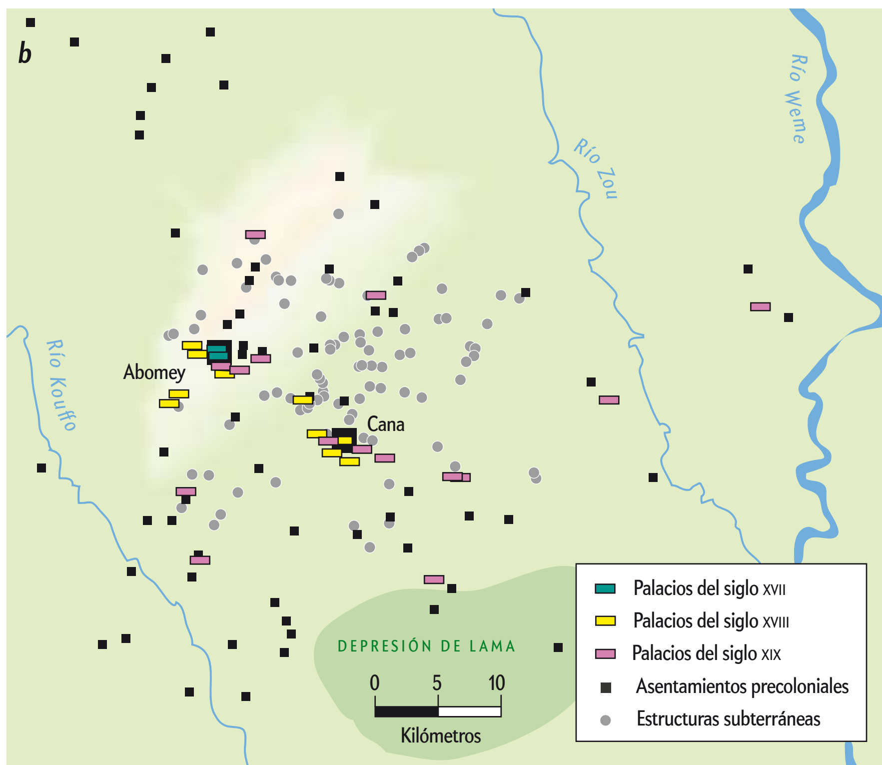
Kenneth Kelly comenzó la investigación arqueológica en Savi en 1991. Allí encontró una gran cantidad de objetos (cerámica local, sobre todo) repartidos en un área de cinco kilómetros de diámetro. Dado que tal abundancia de hallazgos a menudo indica el lugar de un asentamiento, Kelly interpretó esa distancia como la que marcaba los límites de un extenso núcleo urbano. En su centro localizó una serie de zanjas profundas que rodeaban un recinto regio de unas 6,5 hectáreas, en el que se hallaban los restos de un gran complejo palaciego. Esta área habría servido como ubicación principal de las ceremonias públicas de ensalzamiento al rey y su dinastía. A los comerciantes europeos se les obligaba a vivir en pabellones comerciales en el interior del recinto real, lo que dio lugar a un mercado que recibía la atenta vigilancia del monarca. Con toda probabilidad, esta estrategia obedecía a un intento de controlar a los mercaderes, una fuente de riqueza —y de inestabilidad potencial— cada vez más importante. En las excavaciones en el palacio afloraron grandes cantidades de artículos de importación: pipas de tabaco holandesas, porcelanas chinas, botellas de vino y licor, e incluso ladrillos holandeses para los suelos de la residencia. Estos objetos fueron hallados en las zonas del palacio más expuestas al público, allí donde el rey recibía a sus invitados. Ello indicaría la importancia que la ostentación de dichos bienes revestía como símbolo de poder y autoridad en la monarquía de Hueda.

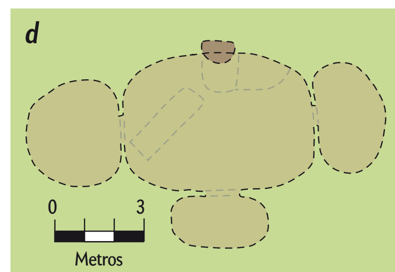
A fin de proseguir la investigación de Kelly, Neil Norman exploró en 2005 un área de unos diez kilómetros de diámetro en torno a Savi. Descubrió, muy diseminados, fragmentos cerámicos y otros objetos, así como las ruinas de innumerables edificios de muros de barro. A partir de estos hallazgos, Norman dedujo la existencia de un asentamiento organizado en tres niveles, lo que concuerda con los relatos históricos que hablan de una densa población en los alrededores de Savi y que afirman que esta funcionaba como centro político y económico. En la cima de esa pirámide se encontraba Savi; en el medio, ciudades semiautónomas de pocos miles de habitantes, y, por último, aldeas rurales de algunos cientos de almas. Estos datos nos permiten inferir que Savi operaba a modo de centro político y económico para las comunidades cercanas.

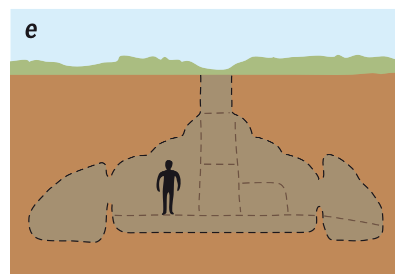
Como ocurría con Allada, las fuentes históricas señalan que buena parte del poder del rey de Hueda dependía de su capacidad para canalizar la riqueza proveniente del Atlántico hacia los jefes rurales. Sin embargo, en los yacimientos rurales explorados por Norman apenas han aparecido artículos de importación. Ello apunta a que las provincias y las inmediaciones rurales nunca se integraron en la economía que generaba la circulación de esos productos. Así pues, el campo no era partícipe de la riqueza atlántica que llegaba a la corte de Savi. Si bien concentrar esta hacienda en palacio constituía la fuente de poder











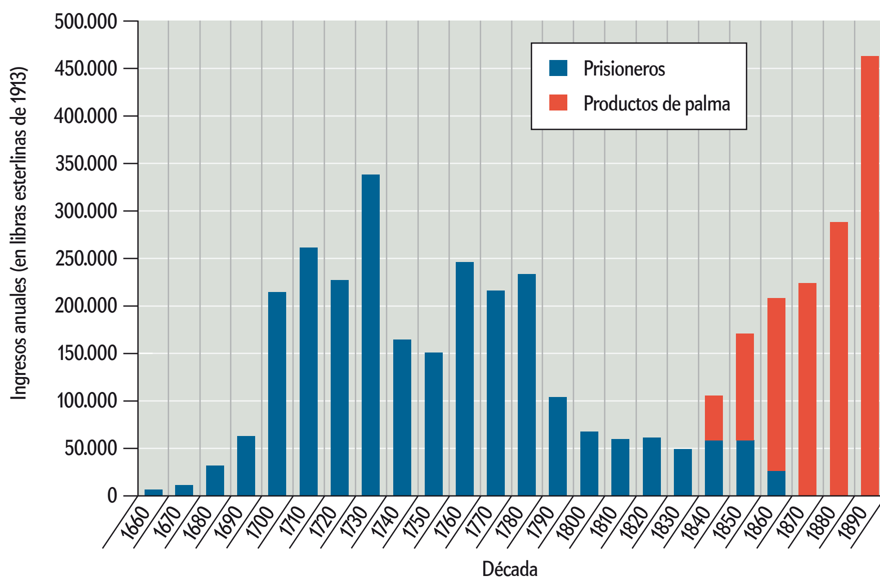
La meseta de Abomey: **El trabajo de campo reciente ha revelado los cambios en las prácticas de asentamiento que experimentó la meseta de Abomey entre los siglos XVII y XIX. El Museo de Historia de Abomey (*a*), declarado patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO, se encuentra en el interior del ala renovada del palacio real precolonial. La distribución regional de los palacios reales, las estructuras subterráneas y los núcleos precoloniales (*b*) documentan la extensión del asentamiento y la expansión de la construcción palaciega hacia las áreas rurales durante el siglo XIX, lo que estrechó la integración entre el campo y la ciudad. Los arqueólogos aún investigan la función de las estructuras subterráneas (*c*, *d* y *e*); probablemente, muchas sirvieron como refugio contra las redadas de esclavos.**

ADAPTADO DE: *BÉNIN ARCHAEOLOGY*, DE KLAVS RANDSBORG, 2009 (*esquemas y mapa de las estructuras subterráneas*); FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DEL AUTOR

e influencia de la monarquía, no compartirla crearía no pocas tensiones con los señores rurales. Con toda probabilidad, el fracaso de la monarquía de Hueda a la hora de cultivar la lealtad de las élites provinciales intensificó los conflictos entre la periferia y el centro, entre las clases favorecidas y el pueblo llano, lo que abrió la puerta al colapso político.

EL REINO DEL NORTE

Si la expansión del comercio atlántico del siglo XVII trajo nuevas oportunidades políticas para Allada y Hueda, la competencia por la riqueza que se desató en el XVIII las conduciría al desmoronamiento. El reino de Dahomey, cliente y vecino septentrional de Allada, así como proveedor de prisioneros de sus propias campañas militares, alteró el equilibrio de la zona. Después de casi un siglo de expansión y consolidación en la meseta de Abomey, Dahomey se rebeló contra Allada en 1716. Sus soldados marcharon hacia el sur y conquistaron Allada en 1724 y Hueda en 1727; destruyeron ambas capitales y arrasaron la mayor parte de sus campos. Una vez libre de Allada, Dahomey tomó el control de la principal ruta comercial hacia la costa y se erigió como ejemplo de Estado centralizado en la zona. Durante aquel período, los monarcas dahomeyanos libraron implacables campañas para definir los términos del comercio de esclavos, enfrentándose a menudo a la oposición de los merca-



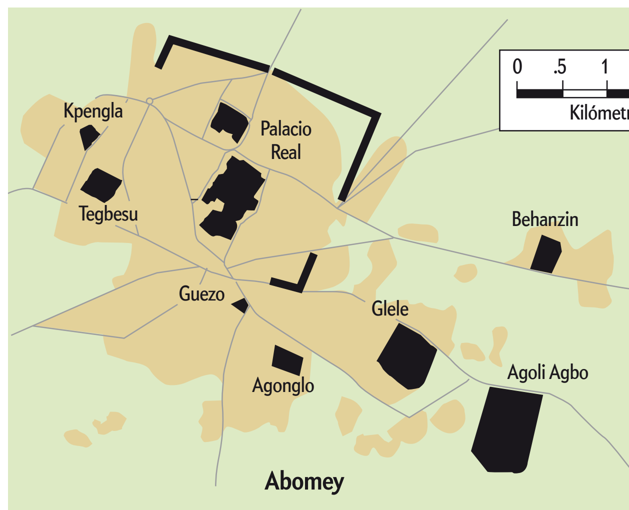
Esclavos y palma: Los ingresos provenientes del comercio de prisioneros fueron superados en el siglo XIX por la riqueza generada en la exportación de productos agrícolas, sobre todo de aceite de palma, en toda la costa de los Esclavos.

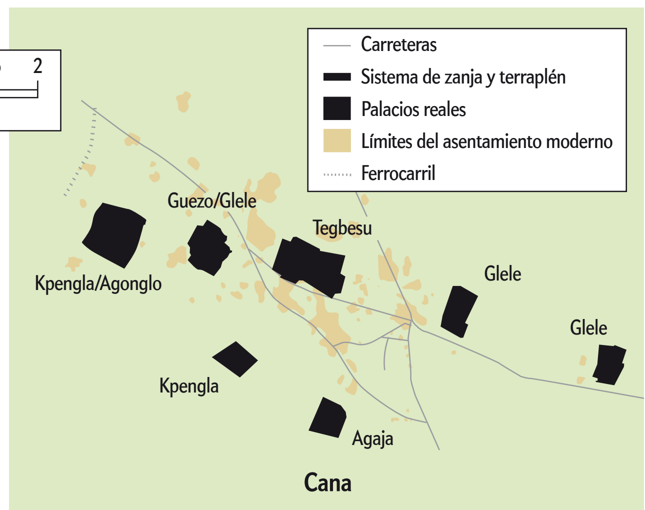
deres y las élites costeñas. Pero, mientras que Allada y Hueda se desintegraron bajo presiones similares, los monarcas dahomeyanos fueron capaces de consolidar su control durante los siglos XVIII y XIX; un objetivo que lograron a pesar de las múltiples contiendas por el poder, las constantes amenazas del vecino reino nigeriano de Oyo y la turbulenta dinámica del comercio transatlántico.

Las estrategias empleadas por los reyes de Dahomey para mantener y expandir el orden político hasta la conquista francesa, en 1894, han sido objeto de una extensa investigación histórica. Se ha destacado el creciente papel del ejército y de las instituciones burocráticas de Dahomey, así como la intensificación de ritos para exhibir y distribuir públicamente la riqueza adquirida en el comercio atlántico. Con la expansión de Dahomey, la estructura de la vida urbana experimentó grandes alteraciones. Mientras que Allada y Savi sufrieron una despoblación considerable, la ciudad portuaria de Whydah (en el reino Hueda) se expandió y acabó convirtiéndose en el principal puerto comercial de la región: hacia mediados del siglo XIX, ya había alcanzado una población de 30.000 habitantes. Las investigaciones arqueológicas en la meseta de Abomey, el núcleo político de Dahomey, indican que las ciudades dahomeyanas del siglo XVIII surgieron como centro de toda clase de estrategias rituales, económicas y políticas, diseñadas para integrar de una manera completamente nueva a las comunidades rurales.

Aunque desconocemos en gran medida la naturaleza de los asentamientos anteriores a Dahomey, no cabe duda de que, en el siglo XVIII, las ciudades dahomeyanas de Abomey y Cana dominaban toda la región. Abomey, una comunidad extensa, levantada alrededor de un mercado y una serie de complejos palaciegos, se erigió como la gran capital política de Dahomey, con no menos de 30.000 habitantes. Cana, por su parte, funcionó como un gran centro administrativo y nodo de las rutas comerciales interregionales. En el siglo XVIII, contaba con importantes mercados y con una población de 15.000 habitantes. Al igual que Gran Ardra y Savi, estas ciudades coronaban la jerarquía de asentamientos en el área: se calcula que entre el 21 y el 33 por ciento de los pobladores de la meseta residía en Abomey y Cana; el resto, en núcleos de entre una docena de familias y el millar de habitantes.

Los estudios relativos a esas pequeñas comunidades se encuentran en sus inicios. Uno de ellos, el proyecto arqueológico Benino-Danois, dirigido por Adandé y Klavs Randsborg, de la Universidad de Copenhague, ha identificado estructuras subterráneas en toda la meseta de Abomey y las áreas adyacentes. Excavadas en roca laterítica con herramientas de hierro loca-





Abomey y Cana: Estos dos centros urbanos precoloniales gemelos se hallaban en la meseta de Abomey. Los mapas muestran la ubicación de los palacios reales y los nombres de los reyes que los construyeron. También se indican los lindes de los núcleos actuales; en el caso de Cana, el asentamiento precolonial era mucho mayor que el presente.

DATOS TOMADOS DE *SLAVERY, COLONIALISM AND ECONOMIC GROWTH IN DAHOMEY, 1640-1960*, DE PATRICK MANNING, 1982 *(relación de ingresos)*; *AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE (mapas)*







Bienes comerciales: La imagen muestra algunos de los artículos recogidos por el autor en las excavaciones de los recintos palaciegos de los siglos xviii y xix, en Cana (*de arriba abajo y de izquierda a derecha*): mecanismos de trabuco de chispa, conchas de cauri (empleadas como moneda), botellas de ginebra, abalorios para el intercambio y fragmentos de pipas de tabaco. Todos estos productos eran muy codiciados por las élites dahomeyanas.

CORTESÍA DEL AUTOR

les, solían contar con una entrada cilíndrica y acceso a otras salas. Se han datado entre finales del siglo xvii y principios del xix, período que coincide con la época del comercio de esclavos y el florecimiento de Dahomey. Aunque su función no se conoce a ciencia cierta, parece muy probable que sirviesen como pozos de almacenamiento de agua y como refugios para la población durante las redadas de esclavos contra Dahomey. Proporcionan una perspectiva muy valiosa sobre la extensión del asentamiento en este período.

Por otro lado, el proyecto arqueológico de la Universidad de California, que dirijo desde el año 2000, está revelando los modos de interacción entre el campo y la ciudad a partir del emplazamiento de los palacios reales. Al igual que en Hueda, estos palacios definieron el paisaje urbano de las ciudades en la meseta de Abomey, como testimonio material del poder y la autoridad reales. En ellos se alojaban el rey y sus dependientes, que solo en Abomey pudieron haber alcanzado las 8000 personas, y desempeñaron un papel importante en las ceremonias reales denominadas *xwetanu*, o «tradiciones anuales». En ellas se veneraba el culto al antepasado real, se sacrificaban cientos de prisioneros humanos y se procedía a la distribución ritual de la riqueza; la mayoría, proveniente del comercio atlántico.

Nuestras investigaciones han puesto de relieve la importancia de la que gozaban los bienes comerciales para reforzar el poder de la élite de Dahomey. El descubrimiento de grandes cantidades de productos (vajillas de cerámica, botellas de alcohol y pipas de tabaco) en los complejos palaciegos de Cana confirma que, al igual que en Hueda, estas mercancías desempeñaron un papel crucial a la hora de garantizar las reivindicaciones de poder de la clase dirigente. Sin embargo, en inspecciones recientes llevadas a cabo en las zonas rurales aledañas a Cana, no se ha hallado tal abundancia de material importado. Esto indica que, al igual que en Hueda, la circulación de la riqueza atlántica en Dahomey se hallaba muy restringida a la esfera del palacio real. En este aspecto, Hueda y Dahomey guardan bastantes semejanzas.

Sin embargo, las estructuras palaciegas menos conocidas, distribuidas a lo largo de la meseta, refieren otros acontecimientos. Los documentos históricos sugieren que estos complejos se consagraban a actividades manufactureras o agrícolas, al tiempo que servían como puntos intermedios entre las rutas comer-

ciales y proporcionaban alojamiento a la soldadesca. Por tanto, los palacios rurales ejercían como nodos clave en la estrategia de la élite para preservar el orden político en sus territorios. Desde el año 2000, nuestro proyecto ha examinado 19 estructuras palaciegas en la meseta de Abomey no documentadas con anterioridad, además de las 9 ya conocidas de la propia Abomey. Los restos de productos europeos y los relatos de la población local, tanto recientes como pasados, han permitido concluir que todas estas estructuras se levantaron en el plazo máximo de un siglo, a menudo bajo el reinado de un mismo monarca dahomeyano. En conjunto, los complejos palaciegos se construyeron entre los siglos xvii y xix, lo que apunta con toda claridad a un fenómeno de la Era Atlántica asociado al florecimiento de Dahomey.

En virtud de la distribución regional de los emplazamientos, podemos concluir que las relaciones entre la urbe y el medio rural de Dahomey fueron cambiando con el tiempo. Como en Hueda, también en Dahomey la construcción palaciega del siglo xvii se limitó a la capital, Abomey, el nodo central de su área de influencia. Las élites provinciales, por tanto, fueron dejadas a su suerte y en gran medida ajenas a la órbita política de la capital. Sin embargo, no mucho después de conquistar a sus vecinos del sur, Dahomey empezó a construir palacios en pueblos y ciudades a lo largo de las principales rutas de transporte de prisioneros a la costa. Esta distribución sugiere que Dahomey libró una implacable campaña para proyectar su autoridad más allá de la capital, con estrategias bien distintas de las adoptadas por Hueda en el siglo xvii. El reino consiguió así asegurarse el control de estos nodos, tan importantes para el comercio interregional. Ello le permitió centralizar la exportación de prisioneros y controlar el acceso a los tejidos exóticos, las cerámicas y los demás productos que recibía como contrapartida.

Ya en el siglo xix, la construcción de palacios amplió de manera considerable la influencia de la élite. Esta alcanzó las zonas rurales de Abomey y Cana, donde se construyeron grandes complejos palaciegos, así como otros centros satélite menores. Ello sugiere que Abomey y Cana sirvieron como centros administrativos, desde donde el poder real se distribuía de manera uniforme a lo largo de todo el territorio. Así como, en el siglo xviii, la expansión palaciega hacia el sur puede explicarse por los intentos de los monarcas de Dahomey de unir los centros urbanos con la costa, el patrón del siglo xix obedece al entramado de fuerzas internacionales que inundaron la región.

FIN DEL COMERCIO DE ESCLAVOS

La dinámica de la región cambió por completo en el siglo xix. Los ingresos reales procedentes del comercio de esclavos cayeron en picado a medida que la práctica fue aboliéndose: a la prohibición danesa (1803) siguieron las de Gran Bretaña (1807), Estados Unidos (1808), Holanda (1814), Francia (1818), Países Bajos (1818), Suecia (1824), España (1835) y Portugal (1836). Entre 1797 y 1804, las fortalezas europeas de Whydah permanecieron abandonadas; en 1807, el escuadrón de la Marina británica para África Occidental, ayudado en ocasiones por la Marina estadounidense, comenzó a implementar el embargo que, desde hacía décadas, pesaba sobre los barcos de comercio de esclavos. Todo ello provocó un descenso drástico en el número de cautivos que partían de la costa de los Esclavos. Al mismo tiempo, los emisarios europeos animaron a los Estados africanos occidentales, como Dahomey, a desarrollar el comercio de productos agrícolas; sobre todo, aceite de palma. Este producto comenzaba a interesar a Europa como materia prima para la fabricación de jabones, velas y lubricantes industriales.

El cambio ejerció un profundo impacto en la capacidad de los Estados de la región para mantener el orden político, lo que derivó en lo que Antony Hopkins, de la Universidad de Texas, denominó en *Economic History of West Africa* («Historia económica de África Occidental», 1973) una «crisis de adaptación». Esta se originó por el efecto democratizador del comercio con productos de palma, que debilitó el poder de la élite. Mientras que el capital económico y político necesarios para participar en el comercio de esclavos se concentraba en manos de la clase dirigente, los productos de palma podían producirse y venderse a pequeña escala. Cualquiera que contase con una vasija y una palmera podía participar en el comercio atlántico, lo que dio lugar a que algunos pequeños hacendados y mercaderes acumulasen una riqueza que rivalizaba con la de los monarcas: un proceso social potencialmente desestabilizador.

Las dinastías reales del occidente africano se vieron obligadas a tomar decisiones económicas. Algunas, como Dahomey, capearon la transición. Cuando la demanda de humanos como mercancía fue sustituida por la demanda de mano de obra, la organización política y económica de Dahomey se transformó



Impuestos: **A medida que crecía la economía agrícola de exportación, el Estado de Dahomey vio la posibilidad de beneficiarse de los mercados rurales. Lo consiguió, en parte, cobrando impuestos. Los *denun* eran centros de recaudación instalados a lo largo de las principales carreteras y accesos a los mercados.**

IMAGEN DE *TROIS MOIS DE CAPTIVITÉ AU DAHOMEY*, DE EDMOND CHAUDOIN, 1890

por completo. El reino continuó lanzando campañas militares y tomando prisioneros en los Estados vecinos, para forzarles ahora a trabajar en la producción agrícola a gran escala. Por un lado, aumentó el número de esclavos en la región; por otro, esa transición económica expandió los mercados locales e incrementó la relativa riqueza de las comunidades rurales. Como consecuencia, se produjo en Dahomey una ruralización generalizada de la economía política.

El Gobierno dahomeyano respondió con un sistema de impuestos dirigido a la producción agrícola y a los mercados regionales. Los funcionarios controlaban los mercados más importantes de Dahomey, se encargaban de recaudar los tributos y de mantener la infraestructura comercial. Además, se creó una red de puestos de recaudación, denominados *denun*, con el objetivo de gravar también a los viajantes de comercio. Frederick Forbes, un oficial de la Marina británica que entre 1849 y 1850 visitó Dahomey dos veces, escribió:

> «Los impuestos, onerosos para todos, se arrendan a recaudadores. Los titulares de las aduanas cuentan con cobradores en todos los mercados, quienes reciben una cantidad de cauris determinada por el valor de los productos en venta. Además, hay recaudadores en todas las carreteras públicas que conducen de un distrito a otro, así como en la laguna a ambos lados de Whydah. En suma, todo se grava y los impuestos van al rey.»

Los complejos palaciegos construidos en Dahomey durante aquel período pueden interpretarse como nodos centrales en un paisaje que integraba, de manera muy estrecha, lo urbano y lo rural. Servían como centros de almacenamiento temporal de los gravámenes que los funcionarios rurales recaudaban en los mercados y en las principales rutas comerciales. Los complejos más alejados de Abomey cobraban por el comercio de artículos locales como cerámica, tejidos, animales y, desde luego, aceite de palma. Estos impuestos, en especie o en metálico, se transportaban después a la capital.

MIRAR BAJO LA SUPERFICIE

Los reinos de Allada, Hueda y Dahomey adquirieron relevancia en un período de gran oportunidad económica e inestabilidad potencial, motivo por el que aparecen muy a menudo en los debates relativos al impacto que ejerció la expansión comercial atlántica sobre esta región africana. Allada y Hueda se citan con frecuencia como víctimas políticas del comercio de esclavos, mientras que Dahomey suele considerarse beneficiario de ese mismo negocio. La investigación arqueológica está aportando datos muy reveladores sobre la manera en que estos fenómenos se hallaban ligados a procesos políticos y económicos más amplios, que determinaron la relativa estabilidad de estas entidades políticas ante la expansión comercial en el Atlántico. En ambos casos, el análisis a escala regional proporciona una visión más profunda de los procesos que enmarcaban la vida cotidiana.

Sin embargo, aun después de tres décadas de investigación coordinada en el sur de Benín, la investigación no se encuentra sino en sus inicios. Hemos comenzado a reconstruir los vínculos políticos y económicos que existían entre las comunidades rurales y sus homólogas urbanas, y hemos explicado de manera convincente la transformación de estas relaciones en virtud de los intentos de las élites locales para acomodarse a las fuerzas transatlánticas. Sin embargo, nuestro conocimiento sobre las sociedades anteriores a la Era Atlántica, el germen de las comunidades urbanas posteriores, resulta muy escaso. Asimismo, ignoramos en gran medida la influencia que las revoluciones comerciales de la época ejercieron sobre la vida cotidiana de los cientos de miles de habitantes de estos paisajes urbanos.

A fin de resolver tales cuestiones, las investigaciones actuales se centran en los yacimientos previos al contacto con Europa y en las comunidades rurales que surgieron a la sombra de las ciudades palaciegas. Algunas examinan los sistemas locales de producción e intercambio que se vieron transformados por la invasión comercial atlántica. El estudio de las ciudades de la costa de los Esclavos ha convertido el África Occidental de la Era Atlántica en una valiosa fuente de información sobre la naturaleza del urbanismo para la arqueología global. De igual modo, esas investigaciones mejorarán nuestra comprensión del contexto cultural en el que surgieron aquellos Estados, al tiempo que deberían ayudarnos a entender lo complejo de la vida bajo la embestida de las fuerzas transatlánticas.



Restos del pasado: Las ruinas de los palacios dahomeyanos aún pueden verse en toda la región. En la imagen, los restos del palacio decimonónico del rey Glele de Cana-Mignonhi, conocido como *Jehoué*, o «casa de cauri». En este lugar, el 4 de noviembre de 1892, las «guerreras amazonas», miembros de un regimiento militar dahomeyano compuesto solo por mujeres, hicieron un desafortunado último intento de oponer resistencia a las fuerzas invasoras francesas. Poco después, Abomey y el reino entero caían frente a los galos.

CORTESÍA DEL AUTOR

PARA SABER MÁS

The archaeology of african-european interaction: Investigating the social roles of trade, traders, and the use of space in the seventeenth- and eighteenth-century Hueda kingdom, Republic of Bénin. K. Kelly en *World Archaeology*, vol. 28, págs. 351-369; 1997.
Africa and africans in the making of the atlantic world, 1400-1800. J. K. Thornton. Cambridge University Press, 1998.
Continuity, revolution, or evolution on the slave coast of West Africa: Royal architecture and political order in precolonial Dahomey. J. C. Monroe en *Journal of African History*, vol. 48, págs. 349-373, 2007.
Power and landscape in atlantic West Africa: Archaeological perspectives. J. C. Monroe y A. Ogundiran. Cambridge University Press, 2012.

NEUROCIENCIA

Plasticidad auditiva

Los circuitos neuronales que intervienen en la audición se adaptan a los cambios del entorno sonoro

Victoria María Bajo Lorenzana y Fernando Rodríguez Nodal

Los circuitos neuronales son la base de nuestro comportamiento. Aunque se hallan determinados genéticamente, constituyen una red dinámica que posee la capacidad de cambiar en respuesta a las variaciones del entorno. En el sistema nervioso coexisten los circuitos responsables de funciones cerebrales específicas con otros que modifican su funcionamiento según la experiencia, lo cual posibilita el aprendizaje. A esta propiedad se la conoce como plasticidad neuronal, término inicialmente usado por Ion Minea en el sistema nervioso periférico y adoptado más tarde por Santiago Ramón y Cajal para referirse a la capacidad regenerativa del sistema nervioso central. El concepto fue desarrollado más tarde por el neurólogo Jerzy Konorski, y posteriormente postulado a nivel sináptico por Donald Hebb en el conocido aforismo «las neuronas que se activan juntas permanecen juntas», principio del aprendizaje asociativo mediante el cual la activación simultánea de dos neuronas refuerza la conexión sináptica entre ellas.

La plasticidad del sistema nervioso central, y en concreto de la corteza cerebral, no permanece constante durante toda la vida. En los mamíferos se ha definido una ventana crítica, que corresponde al período de vida posterior al nacimiento en el que el cerebro posee una elevada capacidad de adaptación al entorno. Durante ese tiempo, los circuitos neuronales son especialmente plásticos y sensibles a los estímulos ambientales cambiantes. La duración del período crítico depende de la especie y del sistema sensorial considerados. En el desarrollo de la visión binocular en niños, se prolonga entre tres y ocho meses.

Pero aunque los fenómenos de plasticidad neuronal se producen sobre todo en el período crítico, continúan en menor grado durante toda la vida adulta, lo que nos permite adaptarnos a las



Victoria María Bajo Lorenzana y **Fernando Rodríguez Nodal**, expertos en neurociencia, investigan en la Universidad de Oxford los circuitos cerebrales implicados en la plasticidad auditiva.

EN SÍNTESIS

Los circuitos neuronales responsables de la percepción de los sentidos, si bien se hallan determinados genéticamente, sufren un proceso de maduración durante la infancia, período en el que son fácilmente maleables por el entorno.

Asimismo, en los últimos decenios se ha demostrado que los circuitos neuronales mantienen cierta plasticidad durante toda la vida. En el sistema auditivo tal capacidad nos permite adaptarnos a estímulos altamente cambiantes, como las variaciones en la frecuencia del sonido o la procedencia de la fuente sonora.

La plasticidad sensorial, no obstante, se nos puede volver en contra y originar situaciones patológicas, entre ellas, la aparición de zumbidos de oídos, o acúfenos.

nuevas situaciones. En la modalidad sensorial que nos ocupa, la auditiva, se han observado modificaciones neuronales como consecuencia de lesiones periféricas o de procesos de aprendizaje.

En la audición, la plasticidad neuronal facilita la interpretación de los sonidos en función de su localización, muy variable debido a los frecuentes cambios de posición de nuestra cabeza. Sin embargo, esta propiedad puede volverse en contra de algunas personas y originar situaciones patológicas, como sucede con la aparición de acúfenos, o *tinnitus*, en que se perciben sonidos o ruidos sin que exista un estímulo sonoro externo que los origine.

RECONOCER LA FRECUENCIA

La audición constituye un proceso complejo. Se inicia cuando los sonidos se traducen en señales eléctricas en las células receptoras de la cóclea, en el oído interno. Esos mensajes se codifican en forma de potenciales de acción que se transmiten a través del nervio auditivo, y, después de viajar a lo largo de una cadena compleja de núcleos en el tronco encefálico, mesencéfalo y tálamo, alcanzan la corteza auditiva del cerebro, lugar donde se interpretan como sonidos.

La corteza auditiva primaria, que corresponde en humanos al área 41 de Brodman en el lóbulo temporal, posee una organización tonotópica. Es decir, las neuronas que responden a sonidos de frecuencias próximas presentan una localización similar, con una progresión ordenada. Ello da lugar a un mapa de frecuencias en la corteza auditiva, fácilmente observable mediante técnicas de visualización de la actividad cerebral, como la resonancia magnética funcional. La tonotopía recibe también el nombre de cocleotopía, puesto que es una propiedad heredada de la organización de frecuencias en la cóclea, en el oído interno.

En ocasiones, debido a la sobreexposición a un sonido, se produce una lesión selectiva en el oído interno, lo que causa una sordera específica para ese rango de frecuencias. Por ejemplo, en los cazadores resulta característica la sordera en la región de 4000 hercios (4 kHz) por los disparos de las escopetas de caza, sobre todo en el oído más cercano al punto de apoyo de la escopeta. Sin embargo, Dexter Irvine, de la Universidad de Monash, demostró que tras una lesión periférica, las neuronas de la corteza auditiva que debían responder a esos sonidos no se quedaban inactivas ante la falta de llegada del estímulo, sino que comenzaban a reaccionar a las frecuencias vecinas y, como consecuencia, el mapa de frecuencias se resintonizaba. Esta plasticidad neuronal se produce como respuesta a una lesión, pero no compensa el déficit sufrido. Es decir, la sordera respecto a ciertas frecuencias se mantiene para siempre, aunque mejore la sensibilidad para sonidos de frecuencias cercanas.

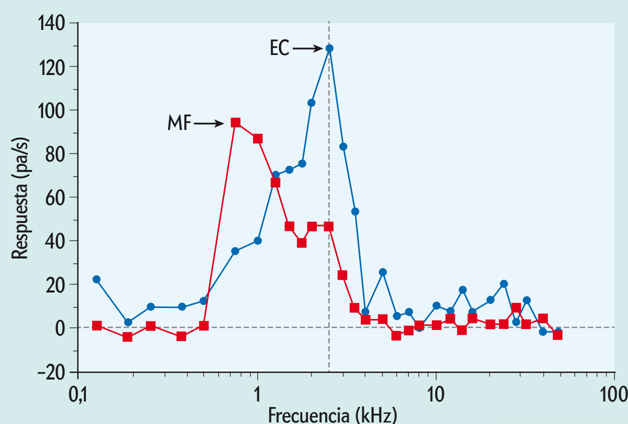
Los fenómenos de plasticidad neuronal que tienen lugar durante el aprendizaje despiertan todavía un mayor interés. Los efectos del aprendizaje en el mapa de frecuencias de la corteza auditiva han sido estudiados mediante experimentos de condicionamiento clásico en animales. Destacan en este campo los trabajos de Norman Weinberger, de la Universidad de California.

Para entender cómo se produce la resintonización de una neurona a través del entrenamiento hemos de definir primero su *mejor frecuencia*. Dentro del campo receptivo de una neurona, constituido por el conjunto de frecuencias e intensidades de sonido a las que responde (en el rango audible para esa especie), la mejor frecuencia es aquella que provoca la mayor actividad eléctrica. Si entrenamos a la neurona con un sonido de frecuencia cercana a la mejor frecuencia dentro de su campo receptivo (estímulo condicionado) y a continuación registramos la nueva actividad de la neurona, se aprecia claramente que la

CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL

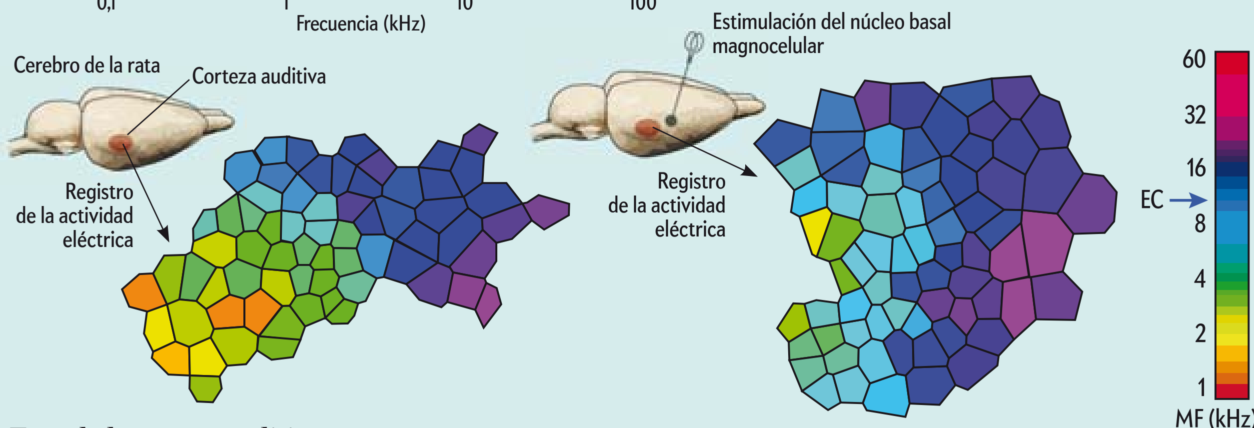
Adaptarse a los cambios de frecuencia

A través de la vía auditiva, la corteza recibe señales del oído interno que contienen la información característica de cada sonido. Una de las propiedades fundamentales del sonido es la frecuencia de las ondas sonoras, medida en hercios (Hz). La actividad eléctrica de las neuronas corticales, medida en potenciales de acción por segundo (pa/s), según la frecuencia del sonido emitido permite conocer cómo se percibe la señal en la corteza auditiva y los cambios adaptativos que se producen en esta zona del cerebro en respuesta a una manipulación del entorno sonoro.



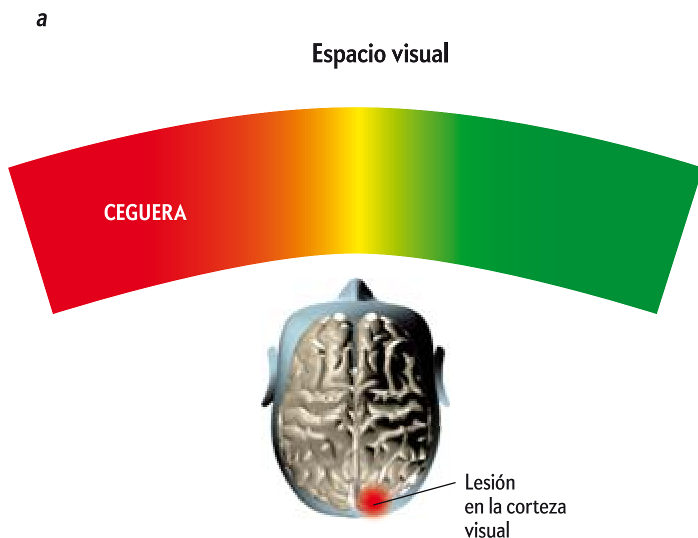
En una sola neurona

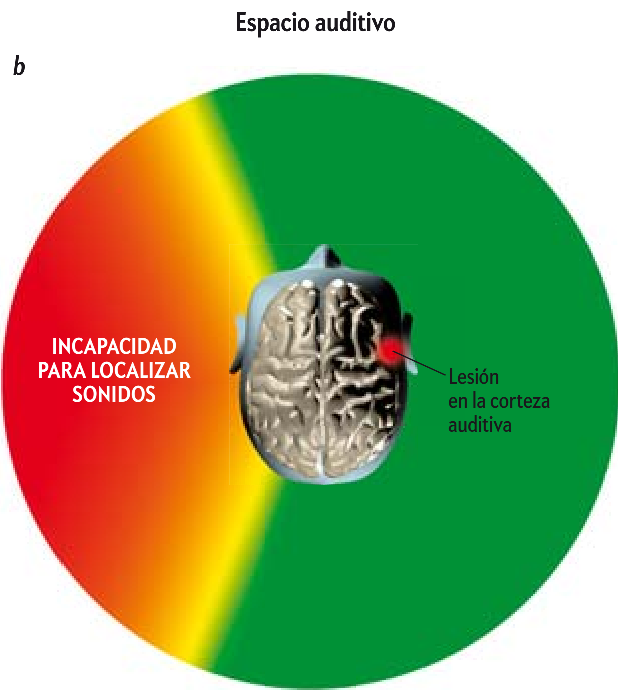
Si registramos la actividad eléctrica de una neurona auditiva en respuesta a sonidos de diferentes frecuencias, podemos construir una gráfica y visualizar la actividad de esa neurona en función de la frecuencia. La *mejor frecuencia* (MF) es aquella a la que la neurona responde más activamente (*línea roja*). Si se entrena a un animal con una frecuencia cercana a la mejor frecuencia, y al mismo tiempo se le asocia un estímulo aversivo, como una descarga eléctrica de baja intensidad en la pata, se produce un aprendizaje asociativo y la misma neurona cambia su mejor frecuencia, que se aproximará a la frecuencia utilizada para el estímulo condicionado (EC) (*línea azul*).



En toda la corteza auditiva

Según el mismo principio empleado para una sola neurona, se puede representar el mapa de frecuencias de la corteza auditiva primaria de la rata, formado por un mosaico de polígonos a los que se ha asignado como mejores frecuencias las de neuronas registradas en cada punto central del polígono (*izquierda*). Al realizar una estimulación con sonidos de una frecuencia de 9 kHz, acompañada de una estimulación eléctrica del núcleo basal, el mapa cortical se distorsiona, con un mayor porcentaje de neuronas sintonizadas a la frecuencia de 9 kHz (*derecha*). Ello demuestra que la plasticidad de la corteza auditiva es posible asociando el entrenamiento auditivo y la activación del núcleo basal, que provee de acetilcolina a la corteza.





Los espacios auditivo y visual. El espacio auditivo es la porción del espacio que nos rodea en el que podemos percibir un sonido de suficiente intensidad; podemos representarlo como una gran esfera alrededor de nosotros. El espacio visual, en cambio, se halla limitado al hemicampo anterior debido a la posición de los ojos en la cara. La representación de estos espacios a nivel cerebral es contralateral debido al cruce o decusación de los axones que llevan la información visual y auditiva. Mientras que la lesión de la corteza visual primaria en un lado del cerebro provoca ceguera en el hemicampo contralateral (*a*), la lesión de la corteza auditiva primaria no provoca sordera en el espacio auditivo contralateral, ya que cada oído cubre todo el espacio auditivo, pero sí causa un deterioro en la capacidad para localizar el origen de los sonidos que se produzcan en dicho espacio (*b*).

mejor frecuencia de la neurona se ha desplazado hacia la utilizada en el entrenamiento. Dicha resintonización resulta aún más evidente si al estímulo de entrenamiento se asocia otro estímulo no condicionado que tenga una repercusión conductual de premio (recompensa con bebida o comida) o castigo (como un golpe de aire en el hocico del animal o una pequeña descarga eléctrica en la pata).

La plasticidad de los campos receptivos de las neuronas corticales presenta todas las características de la memoria asociativa: es específica, discriminativa, se induce rápidamente, se consolida en el tiempo y suele conservarse. Además, Weinberger demostró el papel esencial del núcleo basal magnocelular (o núcleo basal de Meynert), situado en el prosencéfalo, en dicha plasticidad, ya que consiguió idénticos resultados cuando el estímulo no condicionado se sustituía por la estimulación directa de dicho núcleo, principal fuente de fibras nerviosas colinérgicas hacia la corteza.

En una publicación pionera en la revista *Science* en 1998, M. P. Kilgard y M. M. Merzenich revelaron que esa plasticidad no solo se daba en las distintas neuronas por separado, sino también de forma global, en el conjunto de neuronas de la corteza auditiva. En ratas de laboratorio, mediante la aplicación de sonidos de determinadas frecuencias y la estimulación del núcleo basal magnocelular consiguieron la resintonización de los mapas de frecuencias de la corteza auditiva primaria. En el mapa se observó la mayor representación de esas frecuencias, de lo que se dedujo la relación entre la resintonización del mapa auditivo y la relevancia del estímulo.

LOCALIZACIÓN DEL SONIDO

Además de la frecuencia del sonido que oímos, codificada por el receptor del oído interno (cóclea) y que nos ayuda a identificar el objeto sonoro (se trate de un motor de coche o de una melodía tocada en el piano), otra cualidad del sonido es su procedencia. La capacidad de localizar un sonido en el espacio resulta fundamental. Nos permite reaccionar con rapidez ante el claxon de un coche, pero también nos ayuda a identificar los diferentes sonidos y a agruparlos según su ubicación, lo que favorece la comprensión del lenguaje hablado y la identificación de la persona que habla, especialmente en ambientes ruidosos. En el mundo animal, la localización de la presa, del cazador o de ambos, resulta esencial para la supervivencia, sobre todo cuando no se puede recurrir a la visión.

Mientras que el espacio visual queda representado en sitios concretos de la retina, que se activan ante estímulos de una localización determinada, el espacio auditivo no se reproduce en el oído, por lo que la localización del sonido debe calcularse en el sistema nervioso central. Para tal fin, el sistema auditivo de los mamíferos se sirve de las claves de localización. Las claves pueden ser binaurales (del latín *auris*, oído), cuando se compara la información procedente de ambos oídos, o monoaurales, cuando se generan con la información procedente de cada oído por separado. Esta teoría de la localización del sonido fue formulada a principios del siglo pasado por Sir Rayleigh, premio Nobel de Física.

Las claves monoaurales posibilitan la localización de los sonidos en la dimensión vertical, así como la distinción entre sonidos que provienen del hemicampo anterior o posterior cuan-

do las claves binaurales son ambiguas. También se las conoce como claves espectrales, porque se basan en el análisis del espectro o rango de frecuencias de cada estímulo sonoro. Las diferentes frecuencias son filtradas y amplificadas de forma específica dependiendo de la reflexión que sufren las ondas sonoras en el pabellón auricular y de los mecanismos de amplificación en el oído externo y medio.

Las claves binaurales permiten la localización del sonido sobre todo en la dimensión horizontal [*véase* «Audición binaural», por M. Konishi; Investigación y Ciencia, junio de 1993]. Se basan en el análisis de las diferencias que se producen entre ambos oídos en el tiempo de llegada e intensidad de las señales auditivas. Los sonidos más cercanos a un oído llegan antes y con mayor intensidad a este que al oído contrario, que experimenta el efecto de sombra acústica de la cabeza. Se crean así diferencias de tiempo e intensidad interaural que nuestro cerebro utiliza para localizar el sonido. Mediante la combinación de todas las claves, los humanos podemos discriminar cambios de hasta 1 o 2 grados de localización angular, con diferencias interaurales umbrales de hasta 10 microsegundos de tiempo y de 1 o 2 decibelios de intensidad.

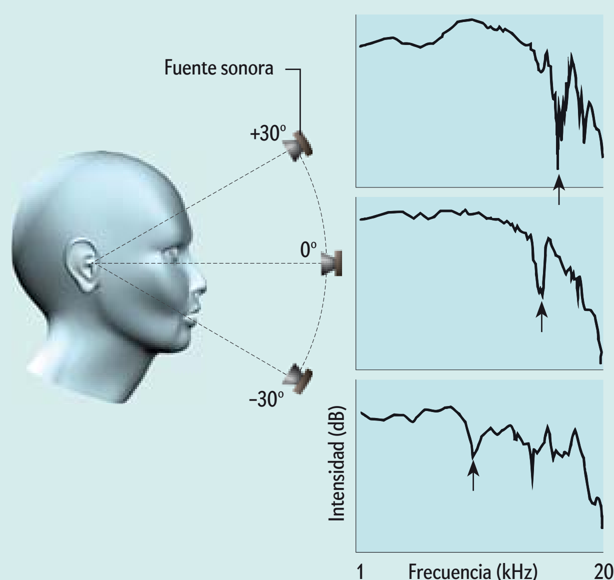
Los primeros centros auditivos en los que convergen las señales procedentes de ambos oídos y en los que se inicia el procesado binaural no son los núcleos cocleares, donde llega la información del nervio auditivo, sino las olivas superiores medial y lateral, estructuras situadas en la porción ventrolateral del tronco del encéfalo y que constituyen la segunda estación de la vía auditiva. En la oliva superior medial se encuentran las neuronas encargadas de procesar diferencias de tiempo interaural. Las neuronas se comportan como detectores de coincidencia, al advertir cuándo dos estímulos de lados opuestos llegan a la vez. Dicho modelo de detectores de coincidencia y el establecimiento de líneas de retraso (creadas por las diferencias de longitud de los axones que convergen la información de ambos oídos en neuronas individuales) fue propuesto por L. A. Jeffress en 1948 y es aún vigente en la actualidad, aunque hace poco se ha puesto en entredicho para los mamíferos. En la oliva superior lateral, las neuronas son sensibles a diferencias interaurales de intensidad; presentan un código de excitación ante la señal proveniente del mismo lado y de inhibición ante la señal contralateral.

Aunque los códigos de localización del sonido se transmiten a través de las sucesivas sinapsis de la vía auditiva hasta llegar a la corteza auditiva, no se ha descrito en esta zona un mapa espacial de neuronas ordenadas según su activación por sonidos de distintas procedencias, como sucede para la frecuencia. Sin embargo, se sabe que las neuronas corticales presentan selectividad espacial, es decir, están sintonizadas a procedencias con-

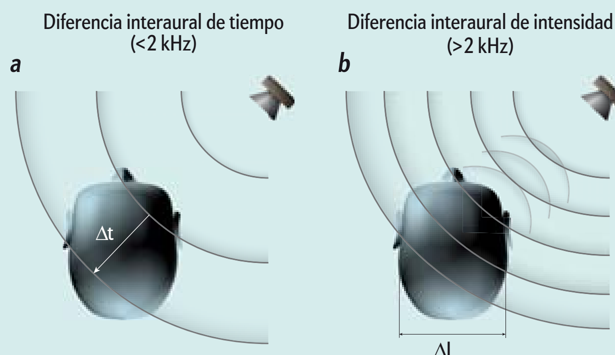
¿DE DÓNDE PROCEDE?

Claves para la localización del sonido

El espacio auditivo no se reproduce en el oído (como sucede con el espacio visual, que se representa en la retina del ojo). Por tanto, la procedencia del sonido debe ser calculada por el sistema nervioso central. Con este fin, el sistema auditivo utiliza dos estrategias: las claves monoaurales o espectrales para discriminar los sonidos en la dimensión vertical y las claves binaurales en la dimensión horizontal.



Claves monaurales
Cuando las ondas sonoras chocan con la cabeza y sobre todo con el oído externo (el pabellón auditivo y el conducto auditivo externo), su espectro se modifica dependiendo de la posición del sonido en el plano vertical. En las gráficas del espectro de frecuencias se observa la aparición de muescas en la intensidad de determinadas frecuencias, según el ángulo de procedencia de la fuente sonora (*flechas*).



Claves binaurales
Las claves binaurales son duales, es decir, integran dos tipos de información: la diferencia de tiempo o fase (Δt) y la diferencia de intensidad (ΔI) a la que llegan los estímulos auditivos en cada oído. La diferencia interaural de tiempo es 0 si el sonido viene de la línea media y máxima si el sonido se sitúa perpendicular a la línea media, cerca de 700-800 microsegundos en los humanos (tiempo que tarda el sonido en recorrer los 15 centímetros que separan ambas orejas, considerando la velocidad del sonido como 330 m/s). Para frecuencias bajas de sonido (inferiores a 2 kHz), un tono continuo puede localizarse en el espacio gracias a la diferencia de tiempo que resulta de la diferencia de llegada de la onda sonora a cada oído (*a*). Con sonidos de frecuencia más alta, la longitud de onda del sonido es menor que la distancia interaural, por lo que el valor de la diferencia de tiempo resulta ambigua, ya que podría interpretarse como distintos ciclos de la onda sonora. Sin embargo, a altas frecuencias (superiores a 2 kHz), la señal llega más atenuada al oído situado más lejos de la fuente sonora; la cabeza crea una sombra acústica al reflejar y absorber los sonidos de longitud de onda más corta que la distancia interaural, lo que contribuye a crear una diferencia de intensidad entre los oídos (*b*).

cretas del espacio. Más importante aún, la principal consecuencia de una lesión cortical es una localización de los sonidos defectuosa, según demostraron en los años ochenta William Jenkins y Bruce Masterton, de la Universidad estatal de Florida en Tallahassee. Mientras que la lesión de la corteza visual primaria en un hemisferio cerebral causa una ceguera que afecta al hemicampo visual contralateral, la lesión unilateral de la corteza auditiva primaria no provoca sordera, pero sí incapacidad de ubicar de forma precisa los sonidos del espacio contralateral.

ADAPTARSE AL ORIGEN VARIABLE DEL SONIDO

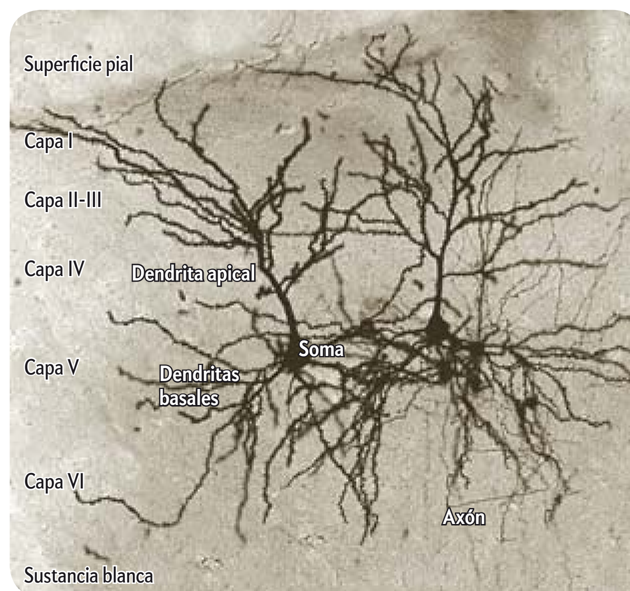
El hecho de que la corteza auditiva resulte esencial para la localización del sonido en el espacio, así como la dualidad de las claves binaurales (al integrar información de tiempo e intensidad), ha permitido generar un modelo de estudio de la plasticidad auditiva en nuestro laboratorio, dirigido por Andrew J. King, de la Universidad de Oxford. El animal experimental usado es el hurón (*Mustela putorius furo*) debido a su fácil entrenamiento, su rango de frecuencias audibles similar al de los humanos y su habilidad para utilizar claves auditivas sin valerse de la vista, (por ejemplo, para cazar conejos en sus madrigueras).

En nuestro modelo de localización auditiva, el hurón aprende a determinar el origen del sonido emitido por uno de los doce altavoces equidistantes situados en la periferia de una cámara circular. Si el animal identifica la procedencia del sonido, recibe una recompensa de agua del dispensador que se halla justo debajo del altavoz que ha sonado, premio que deja de percibir si se dirige a un dispensador incorrecto.

En este modelo experimental es muy fácil manipular las claves binaurales, por ejemplo, poniendo un tapón de silicona que obture uno de los dos canales auditivos externos. Al hacerlo, el número de aciertos en la tarea disminuye de forma drástica, lo que indica el papel esencial de las claves binaurales en la localización del sonido. Con esta manipulación hemos demostrado que el sonido llega mucho más atenuado y también más tarde al oído obturado. Como consecuencia, se crean unas claves binaurales nuevas para una misma localización de sonido.

Observamos que los animales adultos se adaptaban a las nuevas claves binaurales, siempre que mantuvieran el mismo entrenamiento y los aciertos tuvieran alguna repercusión (en este caso, la recompensa de recibir agua). Tras varios días de entrenamiento, la proporción de aciertos se fue igualando a la proporción previa a la obturación del oído. Se puso de manifiesto, por tanto, la existencia de un aprendizaje perceptual, que solo era posible tras el entrenamiento en la misma tarea y el empleo de idéntica modalidad sensorial (si se introducían estímulos visuales en vez de auditivos, tal adaptación no tenía lugar). De modo interesante, se comprobó que esa adaptación era reversible, es decir, la aptitud para localizar sonidos de un animal acostumbrado a nuevas claves binaurales era igual de buena tras extraer el tapón auditivo.

La capacidad de adaptación en el animal adulto permite explicar por qué el cerebro de los mamíferos puede utilizar las claves de localización de sonidos cuando el cuerpo y, por tanto, la cabeza varían de posición. A su vez, los estímulos pueden ser móviles, con lo que el valor de las claves cambia de forma dinámica. Los resultados sugieren que, al igual que ocurre con la resintonización del mapa de frecuencias, el cerebro adulto de los mamíferos es plástico y capaz de ajustarse a nuevas configuraciones del ambiente sonoro.



Las neuronas piramidales grandes de la corteza forman parte de la vía auditiva descendente hacia el colículo inferior, en el mesencéfalo, donde se modula la información auditiva ascendente (del oído a la corteza). El soma de estas neuronas, con forma de pirámide, se aloja en la capa V. En la porción apical de esta pirámide, un gran tronco dendrítico emerge perpendicular a las capas corticales y se arboriza profusamente a lo largo de su recorrido hasta la capa I. De los otros extremos de esta pirámide emergen de tres a seis dendritas, con ramas que en general se disponen en paralelo a las capas. El axón de estas neuronas llega hasta el colículo inferior. En la imagen se observan dos neuronas piramidales teñidas con el método de Golgi.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

Sin embargo, los hallazgos de los experimentos con el hurón han hecho plantear nuevas preguntas. ¿Se produce un cambio de resintonización, como sucede con las frecuencias, o varía el peso relativo de cada clave de localización? ¿Dónde se produce el cambio y qué poblaciones neuronales se hallan implicadas en él? ¿Qué mecanismos de procesado de la señal se modifican para adaptarse a diferentes claves binaurales?

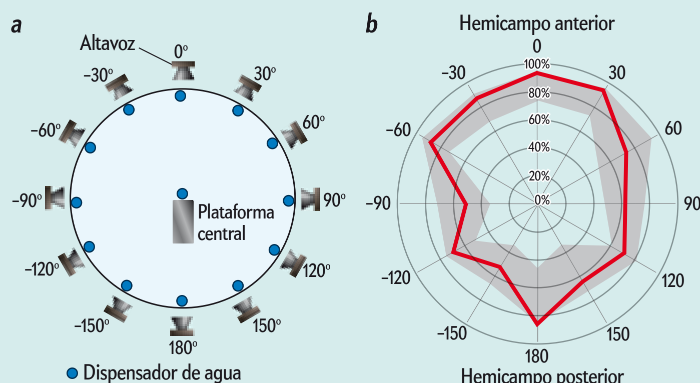
Debido a que en la corteza auditiva primaria se describieron por primera vez los mecanismos de resintonización de las frecuencias y puesto que esa zona resulta necesaria para la localización del sonido, parecía razonable empezar la búsqueda en ese lugar. Tras realizar una lesión en la corteza auditiva primaria del hurón adulto, comprobamos que no solo se producía un déficit en la localización del sonido (en especial de los sonidos de corta duración), sino que además no tenía lugar una adaptación, lo que demostraba el papel esencial de la corteza auditiva primaria en el fenómeno del aprendizaje perceptual.

LAS VÍAS AUDITIVAS DESCENDENTES

Tras saber que la corteza auditiva desempeñaba una función esencial en el aprendizaje perceptual de las claves binaurales, nos preguntamos qué población neuronal de la corteza intervendría de modo decisivo en este fenómeno. Uno de los tipos neuronales que nos llamaban más la atención eran las células grandes piramidales de la capa V de la corteza. Estas células reciben información de casi todas las capas corticales, porque aunque tienen el cuerpo celular o soma en la capa V, presentan una

Localización del sonido en un entorno sonoro cambiante

Gracias a la plasticidad auditiva, el cerebro puede interpretar las claves de localización de sonidos cuando el cuerpo y, por tanto, la cabeza varían de posición, o cuando los estímulos sonoros se mueven de lugar. La plasticidad auditiva respecto a la procedencia de un sonido se ha estudiado en el laboratorio con un animal experimental, el hurón, al que se puede entrenar con facilidad y posee un rango de frecuencias audibles similar al de los humanos.



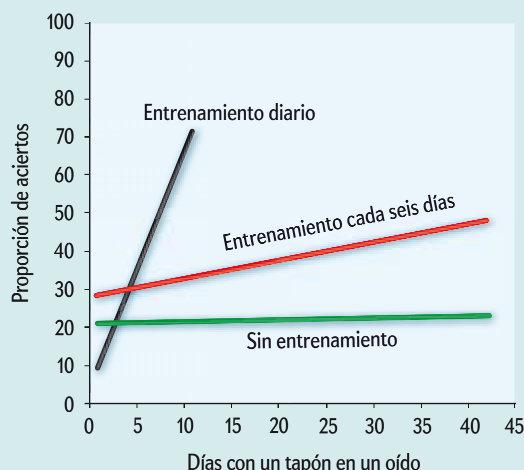
Precisión de la localización

Para estudiar la precisión en la localización del sonido en hurones se emplea una cámara circular con doce altavoces periféricos equidistantes y una plataforma central, bajo los cuales se sitúa un dispensador de agua (*a*). Tras colocar el animal en la plataforma central, este inicia la tarea al beber del dispensador central, lo que permite que el animal tenga la cabeza derecha y hacia el frente. Cuando se desencadena un estímulo auditivo en uno de los altavoces periféricos y el animal adivina cuál es y se aproxima a él, recibe agua del dispensador asociado, pero no recibe nada si va a otras localizaciones. Si representamos el porcentaje de aciertos para cada altavoz (*b*), observamos que los mejores resultados se obtienen en el hemicampo anterior (la línea roja representa un resultado individual y el patrón gris la variabilidad entre casos).



Adaptación a los cambios

Las claves binaurales para la localización del sonido se pueden alterar taponando un oído del hurón, lo que reduce drásticamente la habilidad para localizar el sonido (por debajo del 30 por ciento de aciertos). Pero un hurón adulto puede ajustarse a las nuevas claves siempre que se mantenga el entrenamiento y este vaya asociado a una recompensa (el agua).
La adaptación es rápida si se entrena a diario, lenta si lo hace cada seis días y nula si no hay entrenamiento. También es nula si se afectan las conexiones desde la corteza al colículo inferior, lo que confirma la importancia de las vías auditivas descendentes en la plasticidad inducida por aprendizaje.



gruesa dendrita apical con una orientación perpendicular hacia las capas corticales superiores, así como ramificaciones secundarias y terciarias que reciben e integran información de todas las capas. Por otro lado, estas neuronas participan en las conexiones que emergen de la corteza y sus axones llevan la información que se ha procesado en ella, no solo a otros puntos de la corteza, sino principalmente al tálamo e incluso al mesencéfalo. En esta vía auditiva descendente, la cantidad de axones que desde la corteza retromodulan la información ascendente es al menos tan numerosa como el de axones que, procedentes del oído a lo largo de las diferentes sinapsis, llegan hasta la corteza auditiva. Las vías descendentes filtran y matizan, de acuerdo con la experiencia, las señales que llegan del exterior. Un ejemplo característico en el que intervienen las vías descendentes es el «efecto de la fiesta de cóctel»: en un ambiente ruidoso, como en una fiesta, con múltiples conversaciones a la vez y sonidos de fondo, podemos ignorar el resto de las conversaciones y el murmullo, y centrarnos en la persona con la que estamos hablando, o podemos identificar la voz de algún conocido o de alguien que dice nuestro nombre al otro extremo de la habitación.

Las vías auditivas descendentes parecen hallarse también implicadas en los fenómenos de plasticidad. Lo comprobamos en nuestro modelo de hurones adultos. Inactivamos de forma selectiva el circuito cortico-colicular (la vía neuronal desde la corteza hasta el colículo) para ver la repercusión conductual que tal manipulación conllevaba. Empleamos la técnica de la fotólisis activada con láser, puesta a punto por Jeffrey Macklis, de la Universidad de Harvard. Mediante un láser de infrarrojos eliminamos las células piramidales de la capa V con proyecciones hacia el colículo inferior, tras marcar dichas neuronas con un cromóforo sensible a la luz de esa longitud de onda. Observamos que la destrucción de las neuronas no alteraba la localización del sonido, pero sí el aprendizaje perceptual ante nuevas claves binaurales. Ello confirmaba la implicación de la vía descendente cortico-colicular en los fenómenos de plasticidad

inducida por aprendizaje que permite la adaptación a los cambios en las claves de localización.

Podemos concluir que en la corteza auditiva de los mamíferos tienen lugar numerosos fenómenos de plasticidad, no solo durante los primeros años de vida, sino también en la edad adulta. Además de intervenir en las características organizativas, como el procesamiento espectral (claves monoaurales) o el de las frecuencias de sonido, también determinan las características surgidas por computación neuronal, como el procesamiento binaural y, posiblemente, cualquier tipo de procesamiento neuronal cuyo resultado varíe según el entorno. El conocimiento profundo de los mecanismos celulares y moleculares que fomentan y definen estos fenómenos plásticos será fruto de investigaciones futuras. Los resultados podrían ofrecer una base para el desarrollo de tratamientos que mejoren la agudeza auditiva de personas con ciertos déficits; en especial, de aquellas con implantes cocleares o sorderas unilaterales, que sufren alteraciones en la comprensión del lenguaje hablado, sobre todo en ambientes ruidosos, y perciben ecos. Incluso permitiría profundizar en el conocimiento de los trastornos del procesamiento auditivo, que engloban un conjunto de problemas de comunicación poco comprendidos. Estos conllevan una pobre percepción del lenguaje hablado, que da lugar a fracaso escolar y aislamiento social, sin que se haya detectado ninguna anomalía auditiva aparente.

OÍR SONIDOS QUE NO EXISTEN

Hasta ahora hemos visto cómo los estímulos sensoriales que cambian su significado perceptual provocan una adaptación en el cerebro. Pero la capacidad adaptativa de este órgano no es ilimitada y, además, debe mantenerse en él un equilibrio entre plasticidad y estabilidad. Aunque en general hemos considerado la capacidad de adaptación como una ventaja, no siempre resulta así. En determinadas circunstancias, la plasticidad neuronal podría ofrecer el sustrato en el que se asientan ciertos fenómenos patológicos.

De acuerdo con la Sociedad Americana de Tinnitus, cerca del diez por ciento de la población mundial oye silbidos, zumbidos y pitidos al menos en un oído sin que haya una fuente sonora externa o interna que los produzca. Este síntoma, denominado acúfenos, o *tinnitus*, reduce en gran medida la calidad de vida de unos 120 millones de personas en el mundo. La percepción fantasma es inespecífica e incurable y está normalmente asociada a la presbiacusia, la sordera relacionada con la edad avanzada que afecta sobre todo y de forma más temprana a las frecuencias altas, representadas en la parte basal de la cóclea. Sin embargo, los ruidos muy intensos que provocan traumatismo acústico pueden hacer avanzar la aparición del trastorno. De ahí que los acúfenos representen la incapacidad más frecuente que informan los soldados que han participado en conflictos bélicos [*véase* «Zumbido de oídos», por G. Langner y E. Wallhäusser-Franke; Mente y cerebro, n.º 5, 2003].

Por el momento, se desconocen las causas y los mecanismos que desencadenan la dolencia. Pero los modelos experimentales revelan una sugerente relación entre los acúfenos y los fenómenos de plasticidad auditiva. Se cree que los zumbidos de oídos se deben a una reorganización o resintonización del mapa de frecuencias en la corteza auditiva que tiene lugar tras una sordera selectiva para determinadas frecuencias. Los grupos de Jos Eggermont, de la Universidad de Calgary, y Dexter Irvine, de la Universidad de Monash, demostraron que la pérdida de señales de una frecuencia específica en el oído interno ocasionaba una resintonización del mapa de la corteza auditiva, de modo que las neuronas que respondían con preferencia a la frecuencia desaparecida se resintonizaban y comenzaban a reaccionar ante las frecuencias adyacentes. Como consecuencia, en el mapa de la corteza, las frecuencias que antes se hallaban en contacto con las desaparecidas se hallaban ahora sobrerrepresentadas; asimismo, en las áreas resintonizadas se advertía un aumento de la actividad espontánea y de la sincronización neuronal.

¿Hasta qué punto los fenómenos descritos en la corteza auditiva tras la eliminación selectiva de los estímulos periféricos causan, son consecuencia o simplemente acontecen en paralelo a los acúfenos? Un estudio reciente del grupo de Michael Kilgard, de la Universidad de Texas en Dallas, ha establecido una clara relación entre la plasticidad cortical y los acúfenos. Ha comprobado que, en ratas de laboratorio, este síntoma desaparece si la resintonización cortical que tiene lugar tras un traumatismo acústico se invierte y vuelve a la situación inicial, lo que ha conseguido mediante la estimulación acústica (con exclusión de las frecuencias sobrerrepresentadas) y al promover la liberación de acetilcolina en la corteza (mediante la estimulación eléctrica del nervio vago). Aunque estos resultados establecen una relación causal entre plasticidad neuronal y el zumbido de oídos, en el futuro se deberá confirmar si tal relación se mantiene en otros modelos experimentales de acúfenos en los que no exista un traumatismo acústico previo.

Resulta también interesante el paralelismo entre los acúfenos y el síndrome del miembro fantasma. A pesar de tratarse de modalidades sensoriales diferentes, en ambos casos se produce una percepción fantasma no asociada con una estimulación sensorial. En el *tinnitus* se perciben sonidos que no existen, mientras que en el síndrome del miembro fantasma se notan sensaciones referentes a un miembro que ha sido amputado. Ambos casos parecen estar relacionados con fenómenos de plasticidad cortical, en la corteza auditiva en el primer caso y en la corteza somatosensorial en el segundo. Además, ambas anomalías provocan molestias o dolor, lo que unido a la imposibilidad de controlarlas conlleva un deterioro en la calidad de vida.

En el futuro, todos los proyectos de investigación que tengan como objetivo conocer los mecanismos intrínsecos que se producen en la célula durante los fenómenos de plasticidad tendrán una gran resonancia. Una vez entendidos estos mecanismos, podremos intentar controlarlos y desarrollar aplicaciones traslacionales para crear terapias encaminadas a curar, o al menos aliviar, los acúfenos y otras sintomatologías relacionadas con una alteración de la plasticidad neuronal.

PARA SABER MÁS

Estudios sobre la degeneración del sistema nervioso. S. Ramón y Cajal. Editorial Moya, Madrid, 1913-1914.

Manual de neurociencia. J. M. Delgado y A. Ferrús. Síntesis Ediciones, Madrid, 2000.

Principles of neural science. E. R. Kandel, J. H. Schwartz y Th. M. Jessell. McGraw-Hill Medical, 4ª edición, Nueva York, 2000.

Tinnitus: a multidisciplinary approach. G. Andersson, D. M. Baguley, L. McKenna y D. McFerran. Whurr Publishers Ltd., Londres, 2005.

Neuroscience: exploring the brain. M. F. Bear, B. W. Connors y M. A. Paradiso. Lippincott Williams & Wilkins, 3ª edición, Filadelfia, 2006.

The auditory cortex. J. A. Winer y Ch. E. Schreiner. Springer Science + Business Media, Nueva York, 2011.

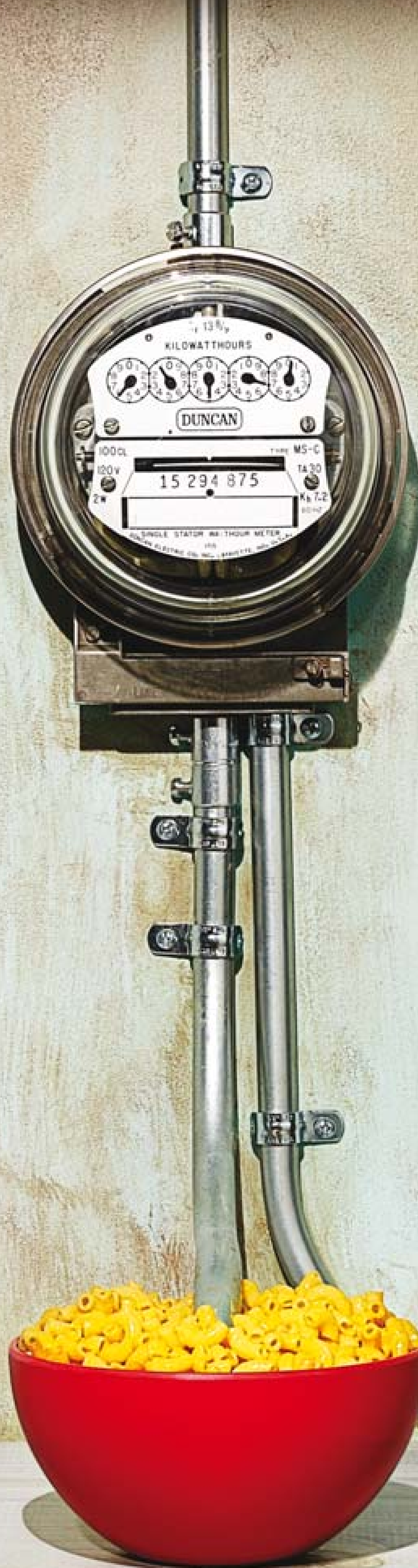
SOSTENIBILIDAD

MÁS ALIMENTOS, MENOS ENERGÍA

Cambios en agronomía, política y hábitos alimentarios reducirían el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero

Michael E. Webber

LAURIE RAAB (*composición*); DAN SAELINGER (*fotografía*)


KILOWATTHOURS
DUNCAN
100 CL
120 V
2 W
TYPE MS-C
TA 30
Kh 7.2
15 294 875
SINGLE STATOR WATTHOUR METER

Michael E. Webber es director asociado del Centro de Política Internacional de Energía y Medioambiente, y profesor de ingeniería mecánica en la Universidad de Texas en Austin.



Combustibles fósiles y abonos sintéticos han sido, durante más de 50 años, los ingredientes clave del aumento de la producción y distribución de alimentos en todo el mundo. La relación entre nutrición y consumo energético se ha mantenido equilibrada hasta hace poco. Pero ahora se abre una nueva era. La producción de alimentos está creciendo de modo acelerado, lo que exige más combustibles a base de carbono y más fertilizantes nitrogenados, compuestos que exacerban el calentamiento planetario y agravan la contaminación de ríos y mares, amén de un sinfín de otros males. Al mismo tiempo, muchos países se esfuerzan en reducir la demanda de energía, en especial la procedente de combustibles fósiles.

Con vistas a reducir el consumo energético, la atención política se ha centrado en el transporte, la producción de electricidad y la construcción. Pero a menudo se ha pasado por alto el sector agropecuario. En EE.UU., alrededor del diez por ciento del presupuesto energético se dedica a la producción, distribución, procesado, preparación y conservación de la materia vegetal y animal que allí se consume, una proporción nada despreciable.

Si se analiza el suministro de comestibles desde un punto de vista energético, se aprecia un espacio donde aplicar políticas lúcidas, innovaciones técnicas y cambios en los hábitos dietéticos que ayudarían a resolver los graves problemas alimentarios y energéticos. Esas modificaciones mejorarían también nuestra salud y la de nuestros ecosistemas.

DE LA GRANJA AL PLATO

Un cálculo elemental revela que la producción de alimentos constituye un proceso poco eficiente. La planta en sí misma ya no lo es: la fotosíntesis, de ordinario, solo convierte en reserva energética alrededor de un 2 por ciento de la energía solar. Ese bajo porcentaje todavía empeora más cuando la materia vegetal se transforma en carne de vacuno (con una eficiencia del 5 al 10 por ciento) o de ave (del 10 al 15 por ciento). Nosotros, al comer, convertimos los alimentos en energía vital, que se almacena en los músculos en forma de glucógeno o grasa.

Dada la abundancia de fotones que a diario recibe la Tierra, tan bajo aprovechamiento no parece importar gran cosa. Pero sí resulta desalentador si se tiene en cuenta la escasez de tierra cultivable y de aguas dulces, la pérdida de fertilizantes por escorrentía, la disponibilidad de combustibles fósiles y las emisiones de gases. La cantidad de energía utilizada para producir víveres supera en gran medida a la que obtenemos de ellos. Así, en EE.UU. se emplean en torno a diez unidades de energía fósil en la producción de una sola unidad de energía alimentaria.

La magnitud de tal consumo queda manifiesta al considerar el total de la población. La energía aproximada que necesita un hombre adulto corresponde a unas 2500 kilocalorías nutritivas diarias (unos 10^7 julios). Los 312 millones de estadounidenses requieren alrededor de 1 EJ (1 exajulio, esto es, 10^{18} julios) cada año. Dado que se utilizan unas 10 unidades de energía fósil para producir una unidad de energía nutritiva, la alimentación de la población estadounidense requiere unos 10 EJ de energía fósil, lo que representa a su vez el 10 por ciento del consumo energético anual total del país, unos 100 EJ. Si se desea reducir el montante energético de la alimentación, habrá que reducir la relación 10:1 entre el gasto energético y los frutos del proceso.

La energía alimentaria que necesitamos los 7000 millones de habitantes del planeta se halla en torno a 25 EJ al año, apenas un 5 por ciento de los 500 EJ del consumo energético mundial de un año. No es que el resto del mundo sea más eficiente que EE.UU. La dura realidad es que unos 1000 millones de seres sufren hambre, otros 1000 millones están cerca de la hambruna y muchas otras personas, sencillamente, consumen poco.

La producción de alimentos aumentó de forma impresionante gracias a innovaciones como el tractor diésel, la cosechadora, el bombeo eléctrico en los regadíos, así como la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, cuya fabricación consume petróleo o gas natural. La revolución verde, iniciada a mediados del siglo xx, ha hecho disparar el rendimiento de los cultivos. Desiertos como el Valle Central de California se han convertido en proveedores mundiales de fruta. Al mismo tiempo, el porcentaje de mano de obra necesaria para la agricultura ha caído en picado.

La energía barata, sobre todo el petróleo, ha permitido la creación de redes de transporte que han mejorado mucho la distribución de los víveres. Tanto que, en pleno invierno, dispone-

EN SÍNTESIS

En torno al diez por ciento del consumo energético de EE.UU. se dedica a criar animales o cultivar plantas, así como a distribuir, procesar, preparar y conservar los productos animales y vegetales con los que se alimentan sus habitantes.

La energía utilizada se puede recortar si se convierten los desechos agrícolas en electricidad; si se implantan técnicas agronómicas punteras, como el riego por goteo, la siembra sin arado, la nivelación de terrenos por láser o la maquinaria guiada por GPS; si se evitan el deterioro de alimentos y la prodigalidad en las comidas, que suponen entre un 25 y 30 por ciento de los alimentos producidos, y si se come menos carne, cuya producción es energéticamente onerosa.

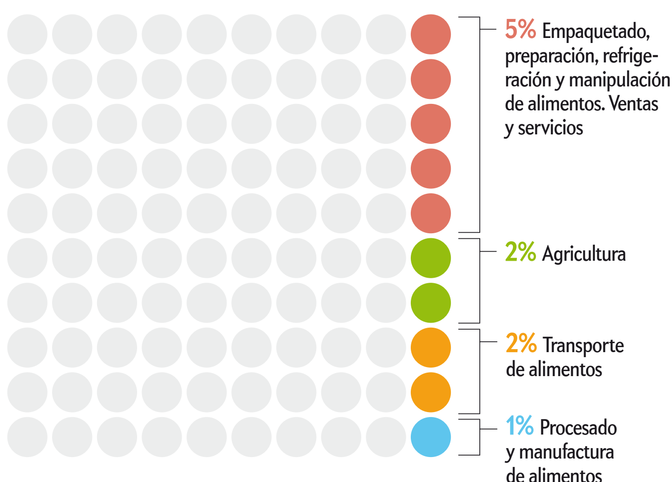
Esas medidas aportarían salud a nuestros cuerpos y a nuestras economías.

UN PROBLEMA SERIO

Una gran porción del pastel

Un sorprendente diez por ciento del presupuesto energético de EE.UU. se gasta en producir alimentos para sus 312 millones de habitantes. Si se aumentara la eficiencia de las explotaciones agropecuarias, el transporte, el procesado y almacenamiento de alimentos, se podría reducir la demanda energética, en especial, de combustibles fósiles.

Porcentaje del total energético invertido en alimentación



mos de cerezas frescas o espárragos verdes traídos de lejanos rincones del mundo. Y se gasta aún más energía en la conservación y preparación de los alimentos.

Cuando el precio de los combustibles era bajo y la contaminación aún no parecía un asunto importante, la prodigalidad y el dispendio energético no preocupaban. Pero ahora los precios han subido y se presta más atención al impacto ambiental, por lo que resulta imperativo rebajar la relación 10:1. En EE.UU., la ineficiencia podría ir a peor ya que, debido a la baratura de la climatización, cada vez más personas se mudan a lugares donde la producción alimentaria local solo alcanzaría a una parte de su creciente censo (como sucede en Phoenix). En esos casos se consume aún más energía, sea para poner en producción tierras pobres, a base de regadíos y abonos energéticamente onerosos, o para importar comestibles desde mercados distantes.

Según todos los pronósticos, las tendencias de carácter global van a agravar el problema. Se prevé que la población mundial exceda los 9000 millones en 2050. El consumo per cápita de energía y de alimentos tiende al alza, sobre todo, porque al crecer los ingresos se tiende a consumir más carne, cuya producción exige mucha más energía que otros víveres. El cambio climático perjudicará también a la agricultura, al reducirse las cosechas como consecuencia de sequías o inundaciones, la intrusión de agua salada en los acuíferos y la elevación de la temperatura ambiental (que mermará en muchos lugares la eficacia fotosintética), así como el uso de tierras cultivables para obtener biocombustibles. Por todo ello, los expertos prevén que la producción de alimentos de aquí a 2050 tendrá que doblarse.

COSTE DEL PRODUCTO LOCAL

Desgraciadamente, al examinar con un enfoque energético algunas soluciones populares sobre producción de alimentos, se aprecia que no siempre sirven. Muchas personas se han aferrado al consumo de productos locales, postulándose de «locávoras», como remedio frente al gasto energético de la agricultura industrializada a gran escala y el transporte de los alimentos desde puntos lejanos. Algunas campañas animan a los residentes a comprar productos de la zona, sea en ferias y mercados o en granjas cercanas apoyadas por la comunidad.

Gastar el dinero donde uno vive, en lugar de enviarlo a gran distancia, resulta deseable en el plano económico. Además, un sistema alimentario local vivaz y robusto supone una garantía ante acontecimientos inesperados, como guerras o sequías. Sin embargo, las granjas locales dedican a menudo tierras marginales a cultivos exógenos, que requieren más abonos sintéticos y más energía para regarlos, y que, aún así, rinden poco. Curiosamente, en ciertos casos, importar comestibles desde miles de kilómetros conlleva un menor coste energético, origina menos emisiones de dióxido de carbono y causa un menor daño al ambiente.

Por ejemplo, la ganadería ovina consume menos energía en Nueva Zelanda que en las islas Británicas, pues allá los animales se crían en pastos que riega la lluvia y no se aplican fertilizantes. Resulta más económico criar los corderos en Nueva Zelanda y expedirlos a Gran Bretaña que hacerlo en este país. Por otra parte, las grandes explotaciones industrializadas, que cuentan con campos nivelados por láser (para minimizar la pérdida de fertilizantes por escorrentía), tractores guiados por GPS (para optimizar el consumo de combustibles y la densidad de los cultivos), semillas transgénicas creadas para minimizar las necesidades hídricas y otros medios, pueden ser más eficientes en cuanto a empleo de recursos que una serie de explotaciones menores, que tal vez se hallen más próximas a los puntos de consumo, pero que aprovechan peor el agua y la energía. Un estudio de la Universidad Stanford concluyó que la agricultura a gran escala ha ahorrado muchísimas emisiones carbónicas, por ser superiores sus rendimientos y por las economías de escala.

Los cultivos verticales en las urbes o la producción de algas forrajeras, todavía en fase experimental, prometen lograr, por metro cuadrado cultivable, una cantidad de biomasa aún mayor que las explotaciones agrícolas locales.

De hecho, ciertas soluciones bien aceptadas de energía renovable empeoran la relación entre obtención de alimentos y consumo energético. Los mercados mundiales de biocombustibles se están surtiendo de materias primas aptas para la nutrición humana, como el maíz, la soja, la caña de azúcar o la palma, lo que origina una competencia malsana, pues tales cultivos reclaman para sí tierras cultivables y agua para regarlas. En 2010, EE.UU. obtuvo cerca de 50.000 millones de litros de etanol de unos 12 millones de hectáreas cultivadas, lo que equivale a la cuarta parte de la cosecha maicera total. Esos valores se elevarán considerablemente cuando ese país trate de dar cumplimiento a una norma federal, que ordena que hacia 2022 el 20 por ciento de todo el combustible líquido para transportes provenga de biocombustibles.

JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*); FUENTE: UNIVERSIDAD DE TEXAS EN AUSTIN

APROVECHAR LOS DESECHOS

A pesar de los difíciles problemas que plantea el nexo alimentación-energía, hay resquicios para el optimismo. Ciertas innovaciones, medidas políticas y cambios de índole cultural orientados a reducir desperdicios e ineficiencias permitirían mejorar la relación 10:1 entre energía consumida y energía alimentaria, y mitigar, a la par, los daños al ambiente.

Un primer paso consiste en dejar de utilizar mazorcas para producir etanol de su almidón, como se hace hoy en EE.UU. Resérvese el grano para la nutrición de la gente o del ganado, y utilícese solo el residuo celulósico (tallo y hojas) para obtener etanol o combustibles sintéticos. En la política energética de ese país hay ya cierto impulso en esa dirección. La Ley de Independencia y Seguridad Energética, de 2007, dispone que en 2022 se consuman unos 136.000 millones de litros de biocombustibles al año, y que 60.000 millones de ellos sean de origen celulósico. Con esta medida se reconoce que el maíz no puede resolver todos los problemas energéticos. Según los expertos, EE.UU. solo puede pro-

MEDIDAS POLÍTICAS

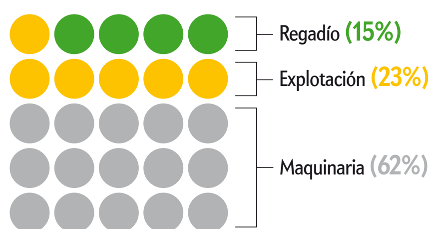
Balance energético del sector agrario en España

Un plan estratégico prevé ahorrar energía gracias a cambios en la maquinaria, sistemas de riego y otras instalaciones

ÁNGEL SÁNCHEZ DE VERA QUINTERO

El sector agrícola tiene un reducido peso en el total del consumo de energía en España. Sin embargo, constituye un área estratégica donde las medidas de eficiencia energética resultan decisivas, no solo porque permiten reducir los costes de las explotaciones sino porque contribuyen a la sostenibilidad del medio rural. El consumo de energía asociado a las actividades agrícolas y ganaderas en el año 2010 alcanzó en España 2786 ktep (1 ktep corresponde a mil toneladas equivalentes de petróleo), unos 0,12 exajulios (EJ). Ello representó el 3 por ciento de la energía final gastada en el conjunto del país (unos 93.000 ktep, o 4 EJ).

El funcionamiento de maquinaria, con 1721 ktep, supuso la mayor proporción del consumo. La cifra corresponde principalmente a la energía utilizada por tractores dedicados a la actividad agrícola, ganadera y forestal, y guarda una relación directa con las hectáreas de cultivo, el número de cabezas de ganado y la superficie forestal repoblada. Otra parte del consumo, 425 ktep (un 80 por ciento procedente de la electricidad y un 20 por ciento del gasóleo), se destinó al regadío, sobre todo para la extracción y distribución del agua de riego por bombeo. Y el consumo restante, 640 ktep, se derivó de las explotaciones agrarias, esto es, el uso de generadores de calor y frío para procesos de pasteurización y conservación, la climatización de naves de ganado e invernaderos, la iluminación de naves y aledaños, la utilización de motores de bancada para accionamientos mecánicos y otros servicios.



Si se analiza la situación futura del sector, se estima una continuidad en el crecimiento de la actividad agraria para el decenio 2011-2020 debido a una consolidación de los avances productivos y la mejora de los equipamientos. Ambos factores harían situar el consumo del sector en 4039 ktep hacia 2020. Sin embargo, tal tendencia no se alcanzará, ya que se prevé un ahorro de 1004 ktep, que se conseguirá con medidas directas implantadas desde las Administraciones públicas, a través del Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 u otras actuaciones estratégicas, así como con la acción indirecta ejercida sobre el sector por cambios tecnológicos y la propia coyuntura económica.

Los criterios y actuaciones para conseguir tal ahorro y llegar a un consumo de 3035 ktep hacia 2020 se concentrarán en cada uno de los tres principales subsectores que gastan energía. En cuanto a la maquinaria, se promoverán las técnicas de mínimo laboreo y siembra directa (hasta alcanzar el 30 por ciento de la superficie cultivada en España en 2020), y se mejorará la eficiencia energética de los tractores que van siendo renovados, proceso que incentivará la Administración a través del etiquetado energético de tractores (semejante al etiquetado de electrodomésticos y automóviles) y un programa de renovación. Con respecto al regadío, se pretende ahorrar un 30 por ciento de energía mediante la reforma y modernización de las instalaciones de bombeo para aumentar su rendimiento y adecuar sus potencias a la variación de carga, y mediante la sustitución de sistemas de aspersión por sistemas de riego localizado. Por último, en el subsector de las explotaciones agrarias, a pesar de que se prevé un aumento del 22 por ciento en su número, el consumo asociado a las instalaciones se rebajará con la renovación del equipamiento de las ya existentes, con lo que se conseguirá un ahorro del 20 por ciento hacia 2020.

Esos criterios y actuaciones se recogen en un conjunto de medidas directas de la Administración dentro del Plan de Acción 2011-2020 (disponible en www.idae.es), que se resume en: ayudas a la formación en técnicas de uso eficiente de la energía en el sector agrario; auditorías energéticas en explotaciones agrícolas (granjas, regadíos, etcétera); planes de mejora de la eficiencia de las explotaciones como consecuencia de la puesta en marcha de las recomendaciones de las auditorías; impulso para la sustitución de sistemas de riego tradicional y aspersión por sistemas de riego localizado; apoyo a la agricultura de conservación, respetuosa con el ambiente, por ejemplo, con ayudas que favorezcan el empleo de máquinas de siembra directa, y por último, complementos económicos para la compra de tractores eficientes, dentro del programa de renovación de tractores agrícolas del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

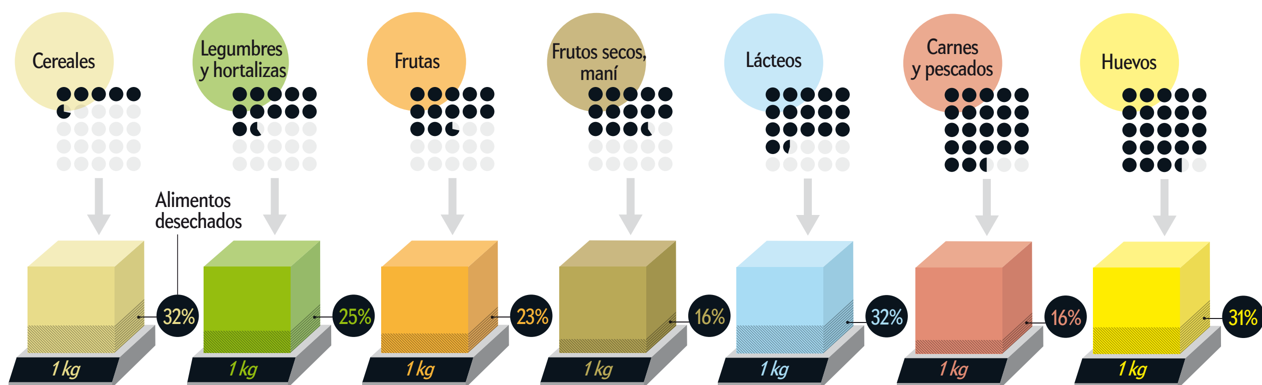
Ángel Sánchez de Vera Quintero es jefe del Departamento de Servicios y Agricultura del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid

PONERSE A RÉGIMEN

Alimentos más eficientes y menos desperdicios

La energía necesaria para la producción de los diferentes alimentos varía muchísimo. Las carnes requieren cuatro veces más que los cereales. Si las dietas se orientasen hacia alimentos energéticamente menos costosos, se recortaría el gasto de energía. Una reducción en la enorme cantidad de comestibles desperdiciados también contribuiría a ello.

Megajulios (MJ) de energía necesaria para producir 1 kilogramo (kg) de alimento (● = 2 MJ)



FUENTE: UNIVERSIDAD DE TEXAS EN AUSTIN

ducir un máximo de 60.000 millones de litros anuales de biocombustible a partir de grano del maíz de los cultivos actuales, sin merma de la capacidad de autoabastecimiento alimentario.

No obstante, la campaña a favor de los biocombustibles promueve el aprovechamiento de las partes alimenticias de la planta, lo que retrasa el empleo de los materiales de origen celulósico, proceso que ofrece más obstáculos. La naturaleza, a lo largo de milenios, ha creado los materiales celulósicos para que no se descompongan con facilidad. Su conversión en etanol entraña deshacer el trabajo de la naturaleza con la ayuda de enzimas, cuya producción industrial resulta onerosa. No obstante, esas dificultades técnicas se pueden superar, lo que nos permitirá tomar más decididamente esa dirección. El recurso a fuentes celulósicas para los biocombustibles y el abandono de las alimentarias pueden contribuir al aprovisionamiento energético de EE.UU. y liberar decenas de millones de hectáreas para el cultivo de otras plantas comestibles.

Otro paso para mejorar la relación entre energía y alimentación consiste en obtener electricidad a partir de los desechos agrarios. El estiércol del ganado constituye un recurso valioso. En otros tiempos, las granjas de tamaño reducido criaban una variedad de animales y cultivaban distintos vegetales. Los granjeros, en lugar de emplear abonos sintéticos, estercolaban sus campos. En la actualidad, con enormes extensiones dedicadas al monocultivo y grandes explotaciones de ganadería intensiva, aquella práctica cíclica se ha perdido. La vasta cantidad de desechos generados por las explotaciones ganaderas desbordan con mucho la posible demanda local, y su transporte hasta las grandes plantaciones resulta demasiado caro. Este sistema origina además daños ambientales, como las charcas de purines y estiércoles, que producen importantes emisiones de gases de efecto invernadero y residuos tóxicos. Sin embargo, esas lagunas albergan una enorme cantidad de energía, y hay muchas de ellas: la ganadería estadounidense crea más de mil millones de toneladas de estiércol al año.

El estiércol podría convertirse, mediante digestores anaeróbicos y microturbinas, en biogases de bajo contenido carbónico, aptos para producir electricidad. El proceso aportaría hasta un 2,5 por ciento de la energía eléctrica generada en EE.UU., a la vez que se reducirían las emisiones de gases. Esta metodología supondría, además, una fuente de ingresos para los granjeros. Algunas instituciones agrícolas punteras, como la Universidad A&M de Texas y de la Universidad Cornell, están buscando formas de incorporar la digestión anaeróbica de estiércoles a las explotaciones ganaderas. Una pequeña ciudad alemana, Juehnde, con la colaboración de Frank Mitloehner, de la Universidad de California en Davis, está generando tanto biogás para uso doméstico que la ciudad se ha independizado de la red nacional de gasoductos. Los líderes políticos podrían incentivar la instalación de digestores y turbinas mediante la financiación a los granjeros, la exención de impuestos para los equipos, sesiones informativas para que los usuarios aprendieran a manejarlos y la implantación de sistemas de medición de energía para descontar la electricidad generada in situ en la factura de suministros básicos.

El dióxido de carbono que arrojan las chimeneas de las centrales térmicas podría servir para cultivar algas destinadas a la nutrición humana, forrajes o material combustible, lo que mitigaría la energía invertida en agricultura. Hay quienes ya están consumiendo algas por razones dietéticas; ciertas cadenas de restaurantes utilizan preparados de algas para dar consistencia a sus platos. Además, los lípidos de las algas se pueden transformar en biogasóleo, con lo que se obtiene un combustible de origen nacional, renovable y pobre en carbono, sin utilizar materias primas comestibles. El resto de la biomasa algal se compone de hidratos de carbono y algunas proteínas, que podrían utilizarse como piensos para ganado. Con ello aumentaría la disponibilidad de maíz para la alimentación humana y mejoraría la relación entre alimentación y energía. Muchas algas crecen en aguas saladas o semisaladas, como las de los estuarios, y no requieren agua dulce. La industria privada (hay tanteos iniciales, como Solazyme), ciertos laboratorios de EE.UU., como el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, y algunas universidades, como las de Texas y California, cuen-

tan con activos programas de ensayos o prototipos. Aunque la implantación a gran escala de remedios a base de algas parece hallarse aún lejos, el potencial de la técnica hace que merezca la pena seguir financiando las investigaciones.

MÁS DE CADA GOTA

Bastaría aplicar a una mayor escala ciertas técnicas agrícolas innovadoras, que ya han sido perfeccionadas en programas experimentales, para reducir decididamente la relación 10:1 entre energía y alimentación. Mediante el riego por goteo, por ejemplo, se alcanzan rendimientos muy superiores, con gran ahorro de agua y de energía para bombearla. En el sistema tradicional de riego, los grandes arcos de rociado, que van rotando en torno a un extremo, crean en los campos enormes círculos verdes sobre las ocres tierras secas, perfectamente visibles desde el aire. Pero es mucha el agua que se malgasta. Al pulverizarla en el aire, una importante fracción se evapora antes de llegar al suelo. Y las gotitas que llegan a posarse tienden a hacerlo sobre hojas o tallos, no sobre las raíces, lo que supone aún más pérdidas por evaporación. En cambio, en un sistema típico de riego por goteo, se instalan finos tubos en el suelo que conducen el agua directamente a las raíces de las plantas. Estudios realizados por la Universidad de Iowa han estimado que, si los cultivadores de maíz de ese estado emplearan esta técnica, reducirían en un 40 por ciento el consumo de agua y rebajarían su factura energética en un 15 por ciento. Existe media docena de grandes empresas de suministros que ofrecen tales sistemas. Aplicados de forma generalizada, permitirían ahorrar al país muchos megavatios hora de electricidad. Una combinación de incentivos para instalar el riego por goteo, más la imposición de recargos por el desperdicio de agua, podría acelerar su adopción.

La agricultura sin labranza representa otra estrategia prometedora. Esta técnica reduce la alteración de los suelos, pues se utilizan para la siembra equipos especiales que colocan las semillas después de abrir estrechas hendiduras, en lugar del burdo proceder de voltear el terreno por arado. El suelo, menos perturbado, requiere una menor cantidad de mano de obra, riego y energía; además, se reducen la erosión y las emisiones carbónicas. Argentina es líder en esta técnica puntera; más de la mitad de sus explotaciones la aplican. La formación de los agricultores sobre las ventajas de no arar puede realizarse mediante servicios de extensión agraria.

El nivelado de los terrenos mediante agrimensura por láser minimiza la erosión, las necesidades de agua de riego y la pérdida de fertilizantes por lavado. Casi todos los campos presentan cierta inclinación, lo que provoca una distribución desigual del agua de riego y de escorrentía. Para asegurar que todas las zonas reciban suficiente agua, a menudo se riega de más en el campo entero, por lo que el agua sobrante se escurre hasta los acuíferos. Si se nivelan los terrenos, se desperdicia menos agua, se necesita menos energía para bombearla y también menos fertilizante, por ser menores los arrastres.

El advenimiento de tractores, cosechadoras y otros equipos provistos de sistemas GPS ha hecho nacer la idea de «agricultura de precisión», que eleva la productividad y rebaja el consumo de energía. El empleo de GPS permite sembrar y cuidar los campos casi al centímetro, reducir espacios muertos y economizar tiempo y combustibles, sin tener siquiera que sentarse al volante. Aunque tales mejoras pueden costar unos 10.000 euros en una explotación de tamaño medio, los beneficios obtenidos compensan la inversión, según estudios de la Universidad Purdue. Para empezar, se reduce el consumo de combustible. La incorporación de GPS y el diagnóstico del terreno permiten cartografiar su estado y afinar la aplicación de abonos químicos, que puede diferir de unas parcelas a otras, y en conjunto requerir menos cantidad. Además, los trabajos en el campo pueden continuar durante la noche, o con niebla o lluvia, cuando la visibilidad es limitada, con lo que se logra una mayor productividad.

MEJORES HÁBITOS

La razón 10:1 entre energía utilizada y energía alimentaria también se rebajaría si disminuyera el desperdicio de comestibles. Cada año, al menos un 25 por ciento de lo cosechado se pierde o se desecha. Esta enorme cantidad representa el 2,5 por ciento del consumo energético anual estadounidense, más que toda la energía del etanol generada en 2011, y más de la que se producirá en 2030 cuando se eliminen las restricciones a la perforación en la plataforma continental externa. Solo con reducir la cantidad de alimentos desperdiciados, se mitigaría el consumo de energía y la emisión de gases con mayor eficacia que con muchas de las onerosas y debatidas políticas de suministro energético que se han propuesto.

Distintas formas de evitar el desperdicio de alimentos pueden aplicarse de inmediato. Se podría invertir en sistemas que diagnostiquen el estado real de los comestibles, en lugar del burdo sistema de fechas de caducidad empleado desde hace decenios. Ejemplo de ello son las etiquetas con tintas sensibles que cambian de color si experimentan temperaturas inadecuadas durante demasiado tiempo. Existen ya compañías que las producen, y con su uso se podría reducir la cantidad de víveres desechados por los supermercados al alcanzar la fecha de caducidad. Tales etiquetas evitarían, asimismo, intoxicaciones provocadas por alimentos en mal estado. Al exigir a las compañías el control de las temperaturas a las que han estado expuestos los alimentos, y no solo del tiempo que llevan envasados, minoristas y consumidores dispondrían de información más exacta sobre su estado.

También serían de ayuda ciertos cambios en los hábitos alimentarios. Los restaurantes podrían dejar de servir raciones pantagruélicas, y los consumidores, dejar de jactarse de sus hazañas en los bufés de barra libre. La comida sobrante se puede guardar y consumir más adelante, tal vez preparada de otras formas. También puede remodelarse la dieta y sustituir, al menos en parte, platos a base de carne, energéticamente onerosos, por otros que no lo son tanto, como frutas, hortalizas, legumbres y cereales.

Como la primera revolución verde ha hecho ver, es posible instaurar cambios a gran escala en solo dos o tres decenios. Cambios que pueden tener consecuencias sorprendentes y resultados muy superiores a los previstos. Pero también puede haber contrariedades: años de abundante producción han elevado la incidencia de la obesidad y agravado el cambio climático. La tecnología, por sí sola, no es suficiente; el hambre en el mundo está por resolver, a pesar de la primera revolución verde. Un enfoque global para reducir el despilfarro de energía en la alimentación, que incluya comportamientos, formas de pensar y políticas nuevas, resultará esencial para lograr éxitos de gran alcance. Sin duda, la nueva revolución verde nos encaminará hacia ellos.

PARA SABER MÁS

Wasted food, wasted energy. Amanda D. Cuéllar y Michael E. Webber en *Environmental Science and Technology*, vol. 44, n.º 16, págs. 6464-6469, 21 de julio de 2010.

El Proyecto BP Foreseer es un instrumento para evaluar el consumo de agua y energía y el uso del suelo: **http://bit.ly/rCqkNL**

Daniel Meyer se doctoró en la Universidad de Washington en Seattle. Después de investigar en Ann Arbor, Ginebra y Helsinki, es ahora profesor de matemáticas en la Universidad Jacobs de Bremen.



Dierk Schleicher obtuvo su doctorado por la Universidad Cornell. Tras trabajar en la Universidad Stony Brook y la Universidad de Múnich, se incorporó en 2001 a la Universidad Jacobs de Bremen. Fue uno de los organizadores de la 50.ª Olimpiada Internacional de las Matemáticas.



MATEMÁTICAS

Un nuevo pilar para la física estadística

Stanislav Smirnov ha dotado de una sólida base matemática a los modelos que describen los medios porosos y el magnetismo. Ello le valió en 2010 una de las mayores distinciones en su campo: la medalla Fields

Daniel Meyer y Dierk Schleicher

El Congreso Internacional de Matemáticos, celebrado cada cuatro años, suele propiciar una de las raras ocasiones en las que esta ciencia goza de atención en los medios. El último tuvo lugar en 2010 en la ciudad india de Hyderabad. Durante la ceremonia de apertura se otorgan las medallas Fields; un galardón que, aunque con una dotación económica relativamente modesta, goza de un prestigio equiparable al de los premios Nobel. Uno de los premiados en 2010 fue Stanislav Smirnov. Aunque se había preparado para la avalancha de periodistas que caería sobre él, las preguntas lograron sorprenderlo: «¿Va usted a rechazar la medalla Fields?». Así había actuado cuatro años atrás Grigori Perelman, lo que provocó que se hablase de él hasta en la prensa amarilla. Pero una medalla Fields no es algo que pueda rehusarse con facilidad y, por supuesto, Smirnov no pensaba hacerlo.

De ahí a la siguiente pregunta: «¿Qué hará con el millón de dólares?». Nuevo desconcierto. Además de la medalla Fields, Perelman había obtenido un millón de dólares del Instituto Matemático Clay, ya que sus investigaciones habían aportado la clave para resolver uno de los siete Problemas del Milenio. Perelman había rechazado también aquel premio.

Pero los trabajos de Smirnov no guardan relación con los Problemas del Milenio. Se mueven en un terreno fronterizo entre las matemáticas y la física que, durante largo tiempo, ha re-

EN SÍNTESIS

La física estadística se propone explicar las propiedades macroscópicas de un sistema a partir de las características microscópicas de las partículas que lo constituyen.

Dos de los modelos bidimensionales más estudiados son el modelo de Ising, para el magnetismo, y los de percolación, que describen la filtración a través de medios porosos.

Stanislav Smirnov demostró que, durante las transiciones de fase, ambos modelos poseen un límite de escala y exhiben invariancia conforme. El modelo de Ising es, además, universal.

Stanislav Smirnov nació en 1970 en Leningrado (hoy San Petersburgo). Ya en la escuela mostró su talento para las matemáticas: en 1986 y 1987 obtuvo la mayor puntuación en la Olimpiada Internacional de las Matemáticas.

Smirnov se doctoró en 1996 en el Instituto de Tecnología de California bajo la dirección de Nikolai Makarov con un trabajo sobre el análisis espectral de conjuntos de Julia, un área en la que trabajaría durante los años siguientes. Tras investigar en Yale, en el Instituto Max Planck para Matemáticas de Bonn y en el Instituto para Estudios Avanzados de Princeton, se incorporó en 1998 a la Universidad Técnica y a la Academia de las Ciencias de Estocolmo. Desde 2003 es profesor de matemáticas en Ginebra.

Recibió la medalla Fields 16 días antes de cumplir 40 años. Las normas del galardón solo permiten conceder la medalla a matemáticos «jóvenes», lo que de manera extraoficial se interpreta como menores de 40 años. Otros galardones recibidos por Smirnov han sido el premio Salem (en 2001, compartido con Oded Schramm), el premio de Investigación Clay (2001) y el de la Sociedad Matemática Europea (2004). En la fotografía, en Bremen, durante las celebración del 50.º aniversario de la Olimpíada Internacional de las Matemáticas, en 2009.



IMO 2009/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

cibido una intensa atención por parte de ambos colectivos: la física estadística en dos dimensiones y sus transiciones de fase. Aunque en este campo los físicos ya habían obtenido algunos resultados dignos de mención, estos no pasaban de postular algunas de las propiedades más importantes de dichos sistemas. Smirnov, en cambio, logró demostrar de manera rigurosa las propiedades fundamentales de dos de los modelos estadísticos más estudiados. Además, llevó a cabo su tarea con métodos completamente distintos de los que los físicos habían empleado hasta entonces; con ello dotó a la disciplina de nuevas herramientas, más potentes y profundas.

El objetivo principal de la física estadística consiste en entender las cualidades macroscópicas de un sistema compuesto por un gran número de partículas. Para ello, debe partir de sus interacciones y propiedades microscópicas y reducir la complejidad del sistema a una aproximación manejable. El ejemplo clásico de este tratamiento nos lo proporciona la termodinámica: la presión y la temperatura de un gas constituyen dos magnitudes macroscópicas simples, que pueden derivarse del comportamiento microscópico de las moléculas que lo constituyen.

EL MODELO DE ISING

En física estadística del estado sólido, el sistema objeto de estudio suele estar compuesto por átomos dispuestos en una red cristalina. Con frecuencia se considera el caso de una red bidimensional; no porque tales modelos se acerquen más a la realidad, sino porque solo así la complejidad del problema se mantiene dentro de unos límites aceptables. En particular, y a diferencia de lo que ocurre en tres dimensiones, esta clase de problemas bidimensionales se deja tratar con una poderosa herramienta matemática: la teoría de las transformaciones conformes.

Uno de los ejemplos más estudiados lo constituye el modelo de Ising, muy empleado en el estudio del magnetismo. En él, cada uno de los átomos de una red plana se comporta como un pequeño imán cuyo polo norte apunta bien hacia «arriba», bien hacia «abajo» (una simplificación que encuentra su explicación en la mecánica cuántica). Cuando un gran número de estos imanes se orienta en la misma dirección, sus campos se suman y el material adquiere propiedades magnéticas desde el punto de vista macroscópico.

En ese modelo, dos imanes vecinos presentan una tendencia natural a apuntar en el mismo sentido. Para explicar este comportamiento no hace falta postular fuerzas de atracción entre átomos vecinos: se debe, simplemente, a que la energía almacenada en dos átomos orientados en sentidos opuestos supera a la que poseen dos átomos alineados. Por tanto, el sistema intentará adoptar la configuración de menor energía posible. De manera algo más precisa, podemos decir que un estado resulta tanto más probable cuanto menor es su energía total. De entre el descomunal número de configuraciones posibles, se observan, con mayor preferencia sobre las demás —en la práctica, de manera casi exclusiva—, aquellas con menor energía.

Como consecuencia, el plano queda cubierto por regiones de mayor o menor tamaño en las que todos los imanes elementales apuntan en el mismo sentido. Cuando una de las dos orientaciones se torna mayoritaria, se observa una magnetización macroscópica neta. Este comportamiento se aprecia también en imanes reales, en cuyo caso dichas regiones reciben el nombre de dominios de Weiss. La acción de un campo magnético externo puede, asimismo, inducir una magnetización en el material, la cual aún perdura tras la desaparición del campo. En este proceso, aplicado a regiones muy pequeñas, se basa el almacenamiento de memoria en un disco duro.

El tamaño medio de los dominios magnetizados depende de una magnitud externa: la temperatura. Esta constituye una medida de la energía que, en promedio, se encuentra a disposición de cada imán elemental. A muy altas temperaturas, el alinea-



Stanislav Smirnov (*derecha*) **junto a Wendelin Werner (ganador de la medalla Fields en 2006) en una ceremonia de doctorado.**

miento entre imanes vecinos se torna irrelevante, ya que estos poseen una gran cantidad de energía. En un sistema frío, en cambio, resulta mucho más apreciable la disminución energética que se consigue cuando los imanes vecinos adoptan una misma orientación, por lo que sí aparecen zonas magnetizadas.

Sin embargo, al aumentar poco a poco la temperatura, las regiones de igual magnetización no reducen paulatinamente su tamaño; en su lugar, desaparecen por completo en el momento en que se alcanza cierta temperatura crítica: por debajo de dicho valor, existen regiones macroscópicas compuestas por imanes orientados en un mismo sentido; pero en cuanto esta se supera, todos esos dominios desaparecen. Este cambio repentino de comportamiento recibe el nombre de *transición de fase* (en analogía con lo que sucede cuando, por ejemplo, el agua líquida se convierte en hielo). Es en las proximidades de la temperatura crítica cuando los dominios magnetizados exhiben un comportamiento más interesante.

DISTANCIAS INFINITESIMALES

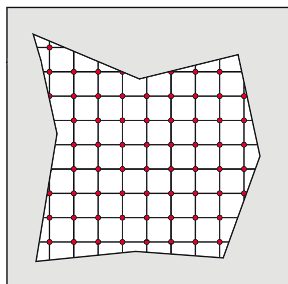
¿Qué ocurre con la forma de esas regiones cuando nos acercamos a la temperatura crítica? Al respecto, hacía ya tiempo que los físicos sospechaban que el aspecto de los dominios no podía depender de la distancia entre los átomos de la red. En particular, en el límite en el que el parámetro de red (la separación entre nodos contiguos) y el tamaño de los imanes tienden a cero, la distribución de probabilidad de las formas de los dominios debería converger hacia cierto límite, el *límite de escala*: en él, la distribución macroscópica de la magnetización resulta independiente de los detalles microscópicos del sistema.

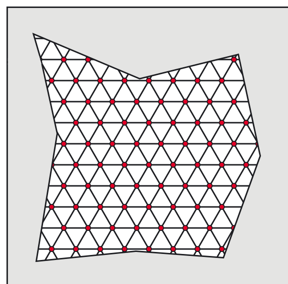
El ejemplo más conocido de esta clase de propiedades lo encontramos en termodinámica clásica. Para describir un gas, a cada punto del espacio se le asigna una temperatura, con independencia de si allí se encuentra una molécula o no. Esto puede parecer contradictorio, ya que la temperatura se define como la energía cinética media de las moléculas. En rigor, esta definición solo cobra sentido cuando hacemos tender a cero el tamaño de las moléculas del gas y la distancia que las separa. Al tomar este límite, estamos considerando el gas como una sustancia continua, con una temperatura bien definida en cada punto. Se trata de una idealización del sistema físico real que, por fortuna, se presta a una formulación matemática manejable. El cálculo preciso del movimiento de cada una de las moléculas del gas sobrepasaría la capacidad de cualquier ordenador.

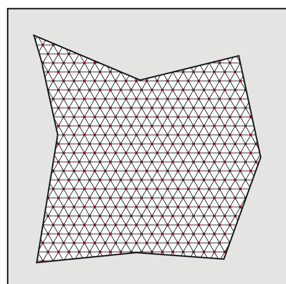
Además, el resultado de tomar valores límite no depende de los detalles de las interacciones locales. En las ecuaciones de la termodinámica, carece de importancia cuántos átomos componen cada molécula o qué fuerzas ejercen unas sobre otras. En particular, este límite proporciona resultados correctos aun con modelos muy bastos e imprecisos. Esta universalidad reviste una importancia fundamental: gracias a ella, pueden obtenerse resultados termodinámicos correctos incluso cuando solo disponemos de una descripción muy vaga de las interacciones entre las moléculas.

A los cristales bidimensionales se les suponía una universalidad similar. En el límite de escala, la forma de los dominios no solo resultaría independiente del parámetro de red, sino también del tipo de red cristalina: triangular, rectangular, etcétera. (La temperatura crítica, por el contrario, sí puede variar bastante entre redes de distintas clases.)

Por último, estos modelos gozarían de una tercera propiedad: la *invariancia conforme*. Dadas dos regiones del plano simplemente conexas, puede demostrarse que siempre existe una aplicación conforme que transforma una región en otra, y viceversa (una región es simplemente conexa cuando «carece de agujeros»; una transformación conforme es aquella que preserva los ángulos en cada punto). Así, la invariancia conforme del modelo de Ising implicaría que no deberíamos preocuparnos por lo complicado de la apariencia geométrica de la muestra: bastaría con calcular la forma de los dominios en un caso sencillo y manejable, como una red con forma de disco. Además, dichas aplicaciones conformes convertirían unas regiones de igual magnetización en otras. Aquí hemos de enfatizar que no se requiere que tales funciones transformen una red en otra; algo que, por lo general, no sucede.







Una misma región bidimensional puede recubrirse con una red rectangular (*izquierda*), con otra triangular (*centro*) y con una red triangular con parámetro de red mucho menor (*derecha*). Cuando este parámetro tiende a cero, numerosas propiedades de los modelos estadísticos no dependen de los detalles microscópicos de la malla.

OSKARI AJANKI, CORTESÍA DE DANIEL MEYER (*Smirnov y Werner*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

Transformaciones que preservan los ángulos

Por lo general, identificamos los puntos del plano con dos coordenadas reales: *x* e *y*. Estas pueden, sin embargo, interpretarse como las dos componentes de un único número complejo: $x + iy$, donde *i* denota la unidad imaginaria (el número que satisface la ecuación $i^2 = -1$). Esta estructura dota al plano complejo de muchas más regularidades matemáticas de las que gozan la recta real o el espacio tridimensional.

Las funciones de números complejos, por tanto, pueden interpretarse como aplicaciones que llevan unos puntos del plano a otros. De entre todas las funciones que podemos definir en el plano complejo, existe una clase que reviste un interés particular: la de las *aplicaciones conformes*. Estas unifican de manera muy provechosa dos características que, a primera vista, parecen contradictorias.

Por un lado, las aplicaciones conformes presentan un comportamiento muy regular: conservan los ángulos en cada punto. Bajo la acción de una función conforme, una región del plano será trasladada, punto por punto, a otra distinta (por «región» entendemos aquí un subconjunto abierto —es decir, del que excluimos la línea que lo delimita— y conexo, «de una sola pieza»). Y, por lo general, lo que era una línea recta de la región original se transformará en una curva en la región de llegada. Sin embargo, el ángulo que subtienden dos líneas cualesquiera antes de dicha transformación coincide siempre con el que forman sus respectivas imágenes (el ángulo entre dos líneas curvas se define como el que forman las respectivas tangentes en el punto de corte). Cualquier figura cambia su aspecto tras una transformación conforme; pero, si aquella es lo suficientemente pequeña, la imagen siempre guardará cierto grado de «fidelidad» con el original. Esa similitud resultará tanto más aparente cuanto menor sea la figura de partida.

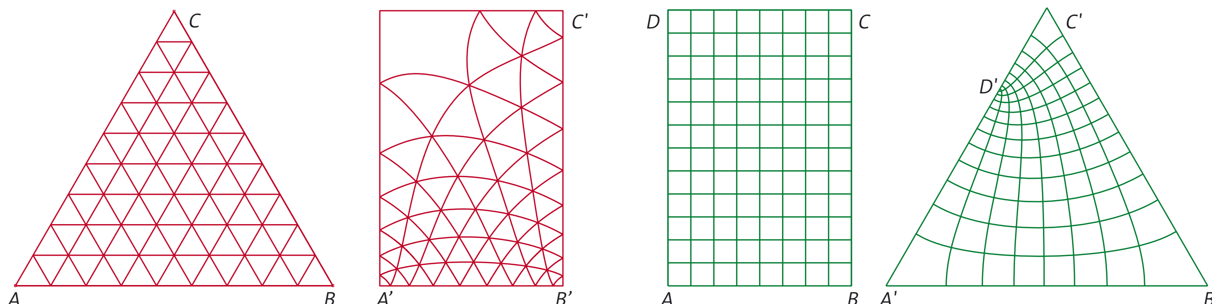
Por otro lado, las funciones conformes muestran una flexibilidad enorme: pueden convertir una superficie dada en —casi— cualquier otra. Tomemos dos regiones arbitrarias del plano complejo: la única condición reside en que no abarquen la totalidad del plano y que sean simplemente conexas («sin agujeros»). En tal caso, siempre existirá una función conforme que haga corresponder cada punto de la primera región con un punto —y solo uno— de la segunda. Esta propiedad se debe a uno de los resultados principales del análisis complejo: el teorema de representación conforme de Riemann.

Quizás el siguiente ejemplo resulte esclarecedor: considere la superficie de Islandia (piense en la imagen por satélite que le ofrece Google Maps) y una hoja de papel rectangular. El teorema de representación conforme de Riemann nos asegura que existe una manera de trazar un «mapa» de Islandia sobre la hoja de papel, de tal manera que la ocupe por completo y sin mostrar una sola porción de mar.

Ese mapa rectangular de Islandia resultará sin duda algo particular: la sinuosa costa del país quedará estirada y ajustada a los márgenes del papel, y la distorsión será notable allí donde haya un fiordo o en las esquinas del folio. Sin embargo, los ángulos se conservarán: no en la frontera misma —lo que sería imposible—, pero sí en cualquiera de los puntos del interior, con independencia de lo próximos que se encuentren a la costa. En particular, dos carreteras que se crucen en ángulo recto conservarán dicho ángulo sobre la hoja de papel. Casas y coches aparecerán con distintas formas y tamaños, pero se podrán reconocer sin apenas esfuerzo.

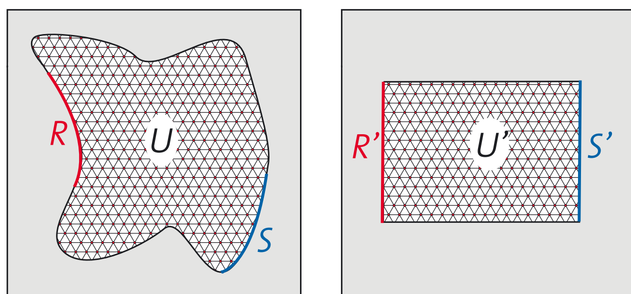
Las aplicaciones conformes revisten una gran utilidad en física. Por ejemplo, una función que puede derivarse a partir de un potencial (como el campo eléctrico o el gravitatorio) conserva esta propiedad bajo una transformación conforme.

Una transformación que estira un rectángulo a lo largo de una dirección pero que lo deja invariante en la otra no es una aplicación conforme: en particular, las diagonales y los lados del rectángulo estirado no subtenderían los mismos ángulos que en el original. Por supuesto, resulta posible transformar uno de esos rectángulos en el otro por medio de una aplicación conforme, pero entonces dicha transformación no llevará las esquinas de una figura a las esquinas de la otra. En general, las funciones conformes que relacionan figuras geométricas simples, como un triángulo y un rectángulo, pueden llegar a adoptar una expresión matemática bastante enrevesada.



Un triángulo equilátero puede transformarse en un rectángulo por medio de una aplicación conforme (*izquierda*) y viceversa (*derecha*). Las letras señaladas con una prima indican la localización de la imagen del vértice correspondiente. En los puntos de corte entre dos líneas, todos los ángulos que forman las líneas interiores a la figura original son idénticos a los que subtienden sus respectivas imágenes.

DANIEL MEYER/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*



Por medio de una transformación conforme siempre puede llevarse una región *U* con extremos *R* y *S* sobre un rectángulo *U'*, de tal forma que las imágenes de *R* y *S* queden en lados opuestos. Los modelos estadísticos en dos dimensiones son invariantes bajo este tipo de transformaciones, lo que supone una enorme ventaja a la hora de estudiar sus propiedades.

Tras esta larga introducción, podemos formular los logros del galardonado: Smirnov demostró que el modelo de Ising a la temperatura crítica posee un límite de escala, que dicho límite es universal y, además, invariante conforme (a la demostración de universalidad contribuyó también Dmitri Chelkak). Estos resultados dotaron de una base matemática sólida al modelo de Ising, el más importante en la descripción del magnetismo.

¿SE CONTAMINARÁ EL POZO?

Otros trabajos de Smirnov versan sobre los modelos de percolación: aquellos que describen la filtración de un líquido a través de un medio poroso [*véase* «La percolación, un juego de mosaicos aleatorios», por H. Duminil-Copin; Investigación y Ciencia, enero de 2012]. Un ejemplo de percolador nos lo proporciona una cafetera. Aunque las aplicaciones más inmediatas de los modelos de percolación incluyen la filtración de petróleo o aguas subterráneas a través de suelos porosos, su formulación matemática resulta tan abstracta y general que permite emplearlos para estudiar la propagación de enfermedades, incendios, electrones en un circuito eléctrico o incluso de rumores en una población.

Consideremos de nuevo un retículo plano (formado por átomos, árboles o personas). En esta ocasión, lo describiremos mediante un grafo en el que las aristas unen los nodos vecinos. Cada nodo se encuentra en uno de dos estados posibles: «abierto» o «cerrado», los cuales podemos interpretar como «permeable» o «impermeable» al paso de fluidos, corriente eléctrica, etcétera. Centraremos nuestra atención en los grupos formados por nodos contiguos que se encuentren abiertos; aquellos en los que resulta posible llegar desde cada uno de ellos hasta cualquier otro por medio de un camino que solo atraviesa nodos abiertos. Si por «abierto» entendemos que «conduce la electricidad», estaremos hablando de regiones conductoras.

Supongamos que configuramos el estado de la red por medio de un proceso aleatorio: cada nodo tendrá una probabilidad p de encontrarse abierto (y $1 - p$ de hallarse cerrado). Si lo desea, imagine dos medios granulares, uno permeable al paso del agua y otro no, que juntamos en proporciones dadas por p y $1 - p$, y que removemos a conciencia. ¿Cuán permeable resulta la mezcla?

En este sistema vuelve a tener lugar una transición de fase: con independencia de la distribución particular de los granos, la mezcla contará con una probabilidad muy elevada de resultar permeable cuando la proporción p del material que permite el paso del agua exceda cierto valor crítico, p_{crit}. Tampoco aquí podemos garantizar nada, ya que siempre existe la posibilidad de que un pequeño número de granos impermeables forme una barrera (si bien dicha probabilidad tiende a cero a medida que aumenta el número total de granos). De nuevo, una formulación matemática más precisa hace referencia a un límite de escala: existe una probabilidad crítica p_{crit} tal que, para cualquier valor de $p > p_{crit}$, la probabilidad de que exista una gran región conexa formada únicamente por nodos permeables (aparte de otras muchas de menor tamaño) tiende a 1 al tomar el límite de un gran número de nodos. Si, por el contrario, $p < p_{crit}$, entonces no habrá más que pequeñas regiones de ese tipo.

Un ejemplo práctico nos lo proporcionaría una banda fabricada con semejante material poroso y dotada de una conexión eléctrica en cada uno de sus extremos: ¿conducirá la electricidad o no? O bien una franja de terreno compuesto por una mezcla de arena y barro, con una fuente contaminante a un lado y un pozo de agua potable al otro: ¿se contaminará el pozo?

Llamemos U a la banda cuya permeabilidad deseamos analizar, R al borde donde se encuentra el flujo de entrada y S al correspondiente al flujo de salida. Supongamos que U define una región simplemente conexa del plano, la cual se encuentra cubierta por una red (por ejemplo, una malla triangular regular), y sean R y S dos subconjuntos de la frontera de U sin puntos en común. ¿Resulta posible conectar R y S por un camino que cruce la malla y que solo transcurra por nodos abiertos? Como antes, nos interesaremos por lo que ocurre en el límite de escala, cuando el parámetro de red se aproxima a cero (o, de manera equivalente, cuando el tamaño de los granos es ínfimo en comparación con la extensión de U). En caso de que $p < p_{crit}$, la probabilidad de que exista dicho camino tenderá a 0, mientras que si $p > p_{crit}$, la probabilidad tenderá a 1. El caso interesante ocurre cuando $p = p_{crit}$. ¿Qué aspecto adquiere la percolación crítica?

Smirnov no solo demostró el hecho, nada obvio, de que el límite de escala existe, sino también que la fórmula para la probabilidad crítica en dicho límite coincidía con una que John Cardy ya había postulado, sin demostración, unos dos decenios atrás:

$$\frac{3\Gamma(\frac{2}{3})}{\Gamma(\frac{1}{3})}\eta^{1/3}{}_2F_1(\tfrac{1}{3},\tfrac{2}{3},\tfrac{4}{3};\eta).$$

Esta fórmula incluye la función gamma y la función hipergeométrica ${}_2F_1$. La cantidad simbolizada por la letra griega eta (η) caracteriza la extensión de los extremos R y S.

También aquí nos encontramos con la invariancia conforme. Los físicos siempre habían mostrado su fe en ello, pero Smirnov logró demostrarlo. Tomemos dos regiones U y U' como las descritas con anterioridad, con extremos respectivos R, S, R' y S', y consideremos una transformación conforme entre U y U' que, además, lleve R a R' y S a S'. La invariancia conforme nos dice que, en el límite de escala, ambas regiones presentarán la misma probabilidad de percolación entre sus extremos. Al igual que en el modelo de Ising, esta propiedad se satisface aunque la aplicación mencionada no transforme una malla en otra.

Una vez más, la invariancia conforme simplifica de manera considerable la vida de los matemáticos, pues implica una gran libertad a la hora de escoger la región U' y sus correspondientes extremos R' y S'. Por ejemplo, U' puede ser un rectángulo, y R' y S' dos lados opuestos de este. Al final, el resultado solo de-

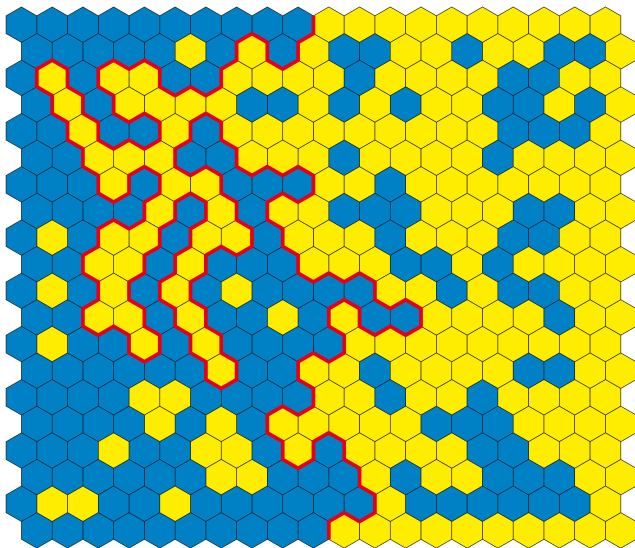
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

penderá de la proporción entre sus lados, la cual queda reflejada en el parámetro η.

TRIÁNGULOS Y RECTÁNGULOS

Lennart Carleson había hallado una interpretación sencilla de la fórmula de Cardy en un caso particular bastante simple: aquel en el que la región *U* se correspondía con un triángulo equilátero. Si llamamos *A*, *B* y *C* a sus vértices y denotamos por *D* un punto arbitrario sobre el lado *CA*, podemos tomar el extremo *R* como el lado *AB*, y *S* igual al intervalo *CD*. En tal caso, la probabilidad de transición toma el valor $|CD|/|AB|$ (las barras verticales denotan la longitud del lado correspondiente). Es decir, la complicada fórmula de Cardy adopta ahora una forma extremadamente sencilla. Por supuesto, resulta necesario demostrar su validez también en este caso particular; pero, si pudiésemos echar mano de la invariancia conforme, estaríamos resolviendo al mismo tiempo el caso general. Smirnov demostró ambos resultados. El aspecto tan enrevesado de la fórmula de Cardy se debe a que la transformación conforme del triángulo en un rectángulo es igualmente compleja.

Ese éxito de Smirnov supuso toda una sorpresa entre la comunidad matemática. En 2001, el mismo año en que Smirnov publicó su resultado, Greg Lawler, Oded Schramm y Wendelin Werner (este último, galardonado con la medalla Fields en 2006) se expresaban en los siguientes términos en un famoso artículo: «En la actualidad, una demostración de este postulado [que el límite de escala existe y que es invariante conforme] parece hallarse fuera de todo alcance». Con todo, lo que nadie ha logrado demostrar hasta hoy es la universalidad de los modelos de percolación. En particular, los argumentos de Smirnov se basan en un uso muy ingenioso de las propiedades de la malla triangular.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN HARRY KESTEN

Percolación en una malla triangular: Todos los nodos se han representado por hexágonos del mayor tamaño posible, de forma que estos rellenan completamente el plano. Los nodos «abiertos» (o «permeables», en un modelo de percolación) se han coloreado de amarillo; los «cerrados», de azul. Los hexágonos que ocupan los bordes son azules en la mitad izquierda y amarillos en la derecha; los demás se han coloreado de manera aleatoria, con probabilidad 1/2 para cada color. La línea roja señala el límite de la región abierta. En el límite de escala, esa frontera genera una curva SLE(6).

Las regiones conexas formadas por nodos abiertos poseen una frontera muy intrincada que, en el límite de escala, cobra un interés especial. Smirnov demostró que su geometría se correspondía con la de las curvas de evolución de Schramm-Loewner (SLE) con parámetro de velocidad κ (kappa). Hacia finales del decenio de los noventa, Oded Schramm había desarrollado un método para describir un conjunto de curvas aleatorias con determinadas propiedades de invariancia; para ello, se había basado en una teoría que Karl Löwner (quien más tarde cambiaría su nombre por Charles Loewner) había formulado casi cien años atrás. Esta clase de curvas aleatorias aparecen con frecuencia en física estadística. Smirnov logró demostrar que la percolación crítica (o, con mayor exactitud, el límite de escala de las curvas que describen la frontera de las regiones conexas abiertas en una malla triangular) se corresponde con la curva SLE con $\kappa = 6$, o SLE(6).

Los trabajos de Smirnov sobre el modelo de Ising guardan una estrecha relación con la misma familia de curvas, pues se basan en la teoría SLE para demostrar la invariancia conforme. En concreto, Smirnov halló que, en el modelo de Ising, la frontera de los dominios a la temperatura crítica se correspondían con SLE(3) y, a partir de ahí, dedujo la invariancia conforme.

ALICIENTE PARA EL FUTURO

Las investigaciones de Stanislav Smirnov tocan las más diversas áreas. Es, además, un maestro a la hora de mostrar de forma clara y comprensible todo lo que rodea su tarea investigadora, su significado y las preguntas que esta suscita. Hace gala de una gran creatividad tanto dentro como fuera de las matemáticas y se considera poseedor de un humor «increíblemente retorcido». Un ejemplo de su capacidad para comunicar podemos hallarlo en su ensayo *How do research problems compare with IMO problems? A walk around games* («¿En qué medida se asemejan los problemas de investigación a los de la Olimpiada Internacional de las Matemáticas? Un paseo por los juegos»), escrito para legos interesados en la materia.

La medalla Fields no se concibe como un mero reconocimiento a los logros pasados, sino también como una motivación para el futuro; razón por la cual se reserva a matemáticos jóvenes. Stanislav Smirnov hizo honor a las expectativas incluso en el tiempo que transcurrió entre la concesión del premio y la ceremonia de entrega: en aquellos meses, demostró que el valor de la constante de conectividad de la red hexagonal (un parámetro que caracteriza cierto tipo de «paseos» por la malla) era igual a $\sqrt{2+\sqrt{2}}$.

Uno de los miembros del jurado, Timothy Gowers, escribió en su blog sobre el Congreso Internacional de Matemáticos: «Uno siempre se pregunta si se ha premiado a las personas correctas; tanto mayor es la alegría y el alivio cuando el galardonado logra otro resultado de importancia incluso antes de la entrega de la medalla».

PARA SABER MÁS

What is... percolation? H. Kesten en *Notices of the American Mathematical Society* n.º 53, págs. 572-573, 2006.

Towards conformal invariance of 2D lattice models. S. Smirnov en *International Congress of Mathematicians* vol. 2, págs. 1421-1451. European Mathematical Society, Zúrich, 2006. Disponible en **arxiv.org/abs/0708.0032**

La percolación, un juego de mosaicos aleatorios. H. Duminil-Copin en *Investigación y Ciencia* n.º 424, enero de 2012.

Página web de Stanislav Smirnov: **www.unige.ch/~smirnov**

ÓPTICA

FÍSICA DE LA GLORIA

La gloria es un bello fenómeno meteorológico cuya explicación resulta de una sutilidad sorprendente. El efecto físico que la provoca podría ayudar a evaluar el papel de las nubes en el cambio climático

H. Moysés Nussenzveig

Si en su próximo vuelo diurno escoge un asiento que le permita observar la sombra del avión sobre las nubes, quizá se vea recompensado con un hermoso fenómeno meteorológico: la aparición de un halo multicolor en torno a la silueta del aparato. Sus anillos iridiscentes no son producto de un arcoíris; se deben a otro efecto, más sutil, llamado gloria. Este resulta tanto más llamativo cuanto más cerca se encuentran las nubes, ya que entonces domina todo el horizonte.

DESDE LA IMAGEN SUPERIOR IZQUIERDA Y EN SENTIDO HORARIO: STEVE JURVETSON; CLAUDIA HINZ; BARBARA LAUGHON; CLAUDIA HINZ








H. Moysés Nussenzveig es profesor emérito de física en la Universidad Federal de Río de Janeiro y ganador del Premio Max Born de la Sociedad Americana de Óptica. Ha desarrollado varios enfoques teóricos novedosos para entender todo tipo de fenómenos ópticos. En la actualidad investiga en biofísica celular.

Si es usted alpinista, tal vez haya visto una gloria poco después del amanecer, alrededor de la sombra que su cabeza proyecta sobre las nubes más cercanas. Así fue descrita en la primera observación documentada, publicada en 1748 y efectuada una década antes por miembros de una expedición francesa a la cima del Pambamarca, en lo que hoy es Ecuador: «Una nube que nos cubría se disolvió y dejó pasar los rayos del sol naciente... Entonces, cada uno de nosotros vio su sombra proyectada sobre la nube... Lo que nos pareció más notable fue la aparición de un halo, o gloria, alrededor de la cabeza, que constaba de tres o cuatro pequeños círculos concéntricos, de muy brillante coloración... Lo más sorprendente fue que, de las seis o siete personas presentes, cada una vio el fenómeno en torno a la sombra de su propia cabeza, sin observar nada alrededor de la cabeza de los demás».

No pocos estudiosos han sugerido que los halos que, tanto en la iconografía oriental como en la occidental, coronan la cabeza de deidades y emperadores pueden haber sido representaciones de glorias. El célebre poema de Samuel Taylor Coleridge *Constancy to an ideal object* les rinde un tributo alegórico. A finales del siglo XIX, Charles T. R. Wilson inventó la cámara de niebla en un intento de reproducir el fenómeno en un laboratorio. Y, aunque fracasó, se percató de que su invención podía utilizarse para detectar radiación, un descubrimiento que le valdría el premio Nobel en 1927.

La sombra del observador o la del avión no desempeñan ningún papel en la formación de una gloria. La única razón por la que van de la mano se debe a que la sombra se proyecta en la dirección de los rayos de sol. En realidad, se trata de un fenómeno de retrodispersión en el que la luz solar se desvía casi 180 grados.

Podríamos pensar que un efecto tan conocido en el área de la óptica, rama venerable de la física, debería haber hallado una explicación hace tiempo. Sin embargo, este fenómeno «tan antiguo como el mundo», en palabras del informe de 1748, se ha resistido durante siglos a todos los intentos por entenderlo. Las glorias resultan mucho más complejas que los arcoíris, y estos ya son mucho más complicados de lo que los libros de física dan a entender.

En principio, tanto las glorias como los arcoíris pueden explicarse a partir de la teoría óptica de principios del siglo XX. Por aquel entonces, Gustav Mie dedujo una expresión matemática que describía la dispersión de la luz por parte de las gotas de agua. El diablo, sin embargo, se encontraba en los detalles. El método de Mie requiere efectuar una suma infinita de términos, denominados ondas parciales. Aunque en la práctica solo importa una cantidad finita de ellos, hace falta evaluar entre cientos y miles de expresiones, cada una de ellas de una complejidad notable. Si dejamos que un ordenador realice el cálculo, obtendremos la solución correcta, pero habremos pasado por alto los mecanismos físicos responsables del fenómeno. La solución de Mie viene a ser una especie de «caja negra» que, a partir de ciertos datos, genera un resultado, pero nada más. Cabe recordar aquí un comentario atribuido al premio nóbel Eugene Wigner: «Está muy bien que el ordenador entienda el problema, pero a mí también me gustaría comprenderlo». Como veremos más abajo, una fe ciega en las simulaciones numéricas puede conducir también a conclusiones erróneas.

En 1965 comencé un programa de investigación con el fin de proporcionar, entre otras cosas, una explicación física completa de las glorias. Gracias a la ayuda de varios colaboradores, la tarea concluyó en 2003. La respuesta requiere tener en cuenta uno de los fenómenos físicos más desconcertantes: el efecto túnel ondulatorio, observado por vez primera por Isaac Newton en 1675. Se trata del mismo efecto en el que se basan algunas de las pantallas táctiles de ordenadores y teléfonos móviles, y de él depende también el problema, aún sin resolver, de determinar cómo contribuyen los aerosoles atmosféricos (nubes, polvo y hollín) al cambio climático.

RAYOS Y ONDAS

A lo largo de los siglos, los físicos han intentado explicar las glorias de varias maneras. A principios del siglo XIX, Joseph von

EN SÍNTESIS

Si miramos hacia una nube desde una montaña o un avión, en ocasiones podemos divisar una gloria: anillos de luz de diferentes colores en torno a nuestra sombra o la del avión.

Al igual que en un arcoíris, los colores se deben a las gotas microscópicas que componen las nubes. En una gloria, sin embargo, la física subyacente resulta mucho más sutil.

La luz que reemite una gloria se debe, sobre todo, al efecto túnel clásico: algunos rayos de luz que no alcanzan la gota pueden, sin embargo, transferirle energía.

La comprensión del fenómeno está ayudando a mejorar los modelos que intentan determinar con mayor precisión el papel que desempeña la capa de nubes en el cambio climático.

Fraunhofer propuso que la luz dispersada hacia atrás por las gotas más internas de una nube sería difractada después por las capas externas. La difracción, una propiedad exclusiva de las ondas, es lo que permite a la luz «doblar las esquinas», algo parecido a lo que hacen las olas cuando sortean una viga vertical y continúan después como si el obstáculo nunca hubiese estado allí.

Según Fraunhofer, esa doble dispersión produciría anillos de difracción de distintos colores, similares a la corona que en ocasiones puede verse sobre las nubes alrededor de la luna. En 1923, sin embargo, el físico B. B. Ray refutó la propuesta de Fraunhofer. Después de experimentar con nubes artificiales, se percató de que los anillos de las glorias mostraban una distribución de color y brillo muy distinta de la observada en las coronas celestes. Además, demostró que esos anillos se originaban en las capas externas de la nube, tras una única retrodispersión por parte de las pequeñas gotas de agua que la componen.

Ray intentó explicar esa retrodispersión con las herramientas que le brindaba la óptica geométrica, asociada históricamente a la teoría corpuscular de la luz, puesto que, en lugar de con ondas, modeliza su propagación por medio de rayos rectilíneos. Cuando, en su viaje por un medio, la luz llega a la interfase con otro (como entre aire y agua, por ejemplo), parte de ella se refleja y parte se transmite, o se refracta. La luz que penetra en una gota de agua experimenta varias reflexiones en los lados opuestos de la gota antes de salir. Ray consideró un rayo de luz paralelo al eje de la gota, que era reflejado una vez al entrar y otra en el lado posterior de la gota. Pero, incluso considerando varias reflexiones internas antes de escapar, el resultado era demasiado débil como para explicar las glorias.

La explicación debía trascender la óptica geométrica y considerar la naturaleza ondulatoria de la luz; en particular, fenómenos como la difracción. A diferencia de la refracción, la difracción cobra importancia a medida que aumenta la longitud de onda. Que la gloria se basa en un efecto de difracción es algo que queda patente en el hecho de que sus bordes interiores son azules, y los exteriores, rojizos, lo que se corresponde con longitudes de onda cortas y largas, respectivamente.

La teoría matemática que describe la difracción por una esfera (como una gota de agua) se conoce como dispersión de Mie. La solución al problema se calcula como una suma infinita de ondas parciales, cada una de las cuales viene dada por una función complicada del tamaño de la gota, su índice de refracción (una medida de cuánto se desvían los rayos de luz al penetrar en el líquido) y el parámetro de impacto (la distancia del rayo al centro de la gota, medida según la perpendicular). Para gotas de una gran variedad de tamaños, el cálculo de la dispersión de Mie resulta imposible de realizar sin un ordenador de alta velocidad. Hasta los años noventa, los ordenadores no alcanzaron la potencia necesaria para obtener resultados realistas aplicables a las nubes, ya que estas se componen de gotas de los más diversos tamaños. Se requerían otros procedimientos para analizar el fenómeno.

A mediados del siglo xx, Hendrik C. van de Hulst, uno de los padres de la radioastronomía moderna, aportó el primer avance significativo en la explicación física de las glorias. Adujo que un rayo de luz que penetrase en la gota muy cerca de uno de sus extremos (es decir, con un parámetro de impacto próximo al radio de la gota), seguiría en su interior una trayectoria en forma de V: rebotaría en la parte trasera y saldría después casi en la misma dirección en la que incidió. Debido a la simetría esférica de la gota, el parámetro de impacto favorable no ocurriría solo para un rayo, sino para todos los que llegasen desde la circunferencia formada por los puntos situados a la misma distancia del centro de la gota. Eso produciría un efecto de focalización que realzaría sobremanera la intensidad de la luz retrodispersada.

Aunque la explicación parece impecable, sufre un serio problema: el índice de refracción del agua no es lo bastante alto como para, tras una sola reflexión interna, devolver el rayo en la misma dirección en la que vino. Como mucho, una gota de agua puede retrodispersar el rayo incidente en un ángulo de 14 grados con la dirección original.

En 1957, Van de Hulst sugirió que esa barrera de 14 grados podría superarse si la luz viajase como una onda de superficie por el borde de la gota. Las ondas de superficie son aquellas que se propagan a lo largo de una interfase entre dos medios y aparecen en una gran variedad de situaciones. Según la propuesta de Van de Hulst, un rayo que incidiese tangencialmente, rozando la gota, viajaría una corta distancia sobre el borde antes de penetrar en el líquido. Después, se propagaría en el interior de la gota hacia la parte posterior, donde se reflejaría. Antes de abandonar la gota, una última travesía sobre la superficie lo pondría en camino. El efecto neto sería una dispersión del rayo en la misma dirección en la que vino, pero en sentido opuesto.

Un posible inconveniente radica en que las ondas de superficie pierden energía a lo largo de la tangente, pero Van de Hulst

CONDICIONES PARA UNA GLORIA

¿Por qué siempre rodea nuestra sombra?

Dado que una gloria se debe a la luz que es retrodispersada en la misma dirección en la que vino, el fenómeno solo se observa cuando el sol, el observador y la nube se hallan alineados. Por tanto, el halo siempre aparecerá en torno a la sombra del observador. Cada color sigue un ángulo ligeramente distinto, lo que produce un patrón iridiscente.



ILUSTRACIONES DE ALFRED T. KAMAJIAN

ASÍ SE FORMA UNA GLORIA

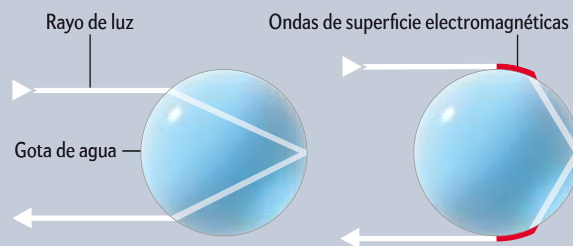
Luz al final del túnel

Aunque las glorias se conocen desde hace siglos, los fenómenos físicos que las causan comenzaron a entenderse bien hace solo unos años. La contribución más significativa se debe al efecto túnel.

Explicaciones previas

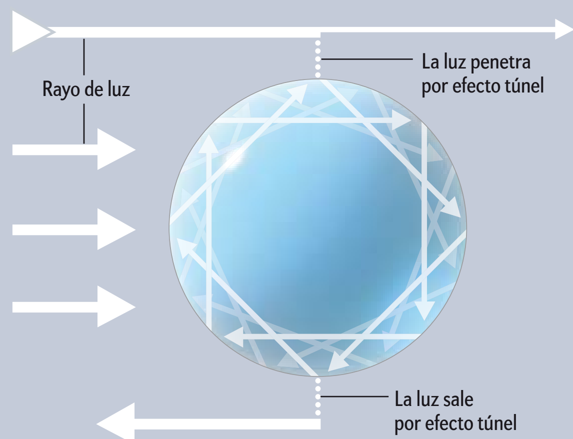
En un principio, el fenómeno se atribuyó a la reflexión de la luz en el interior de las gotas de agua microscópicas que componen las nubes. Al penetrar en el líquido, los rayos se desviarían para, después, reflejarse en la parte trasera de la gota. Al salir, sufrirían otra refracción que los alinearía con la dirección original (*izquierda*). Sin embargo, las propiedades del agua no permiten que la luz se desvíe tanto como para regresar en la misma dirección en la que vino.

Una teoría posterior propuso que los rayos que rozasen la gota podrían propagarse por el borde en forma de ondas de superficie electromagnéticas. Al cubrir una pequeña distancia a lo largo de la superficie de la gota, tanto al entrar como al salir (*derecha, exagerado*), los rayos completarían el giro y volverían a alinearse en la dirección en la que vinieron. Aunque este fenómeno ocurre, solo contribuye a una fracción menor de la luz que desprende una gloria.



Efecto túnel

La teoría óptica de principios del siglo XX había dado con una formulación matemática completa del fenómeno. Sin embargo, los cálculos solo podían ser efectuados por un ordenador y no ayudaban a entender la física subyacente. Hace unos años, el autor demostró que la mayor parte de la luz de una gloria se debe al efecto túnel: algunos rayos cercanos que no tocan la gota pueden, sin embargo, transferirle energía. El efecto túnel es un fenómeno común a todas las ondas, clásicas y cuánticas.



conjeturó que ese amortiguamiento se vería compensado con creces por el aumento debido a la focalización axial. Cuando propuso su hipótesis, no existía ningún procedimiento para cuantificar la contribución de las ondas de superficie. En cualquier caso, toda la física del fenómeno —incluido el papel de las ondas de superficie— debía hallarse cifrada en las series de ondas parciales de Mie. Pero ¿cómo extraerla?

EL EFECTO TÚNEL

Las ondas de superficie no constituyen la única solución posible al acertijo de las glorias. En 1987, Warren Wiscombe, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, y yo dimos con una nueva clave para describir el proceso de difracción: los rayos de luz *exteriores* a la esfera podían contribuir al fenómeno. A primera vista, la idea parece absurda. ¿Cómo puede la gota influir sobre un rayo que ni siquiera pasa a través de ella? Las ondas, sin embargo, exhiben la extraña facultad de transmitirse por efecto túnel, o «traspasar una barrera». Una onda de luz puede filtrarse al exterior aun en circunstancias en las que uno esperaría que permaneciese confinada en un medio, como muestra el ejemplo que describiremos a continuación.

En general, cuando la luz se propaga en un medio (vidrio o agua, pongamos por caso) y llega a la interfase con otra sustancia de índice de refracción menor (como el aire), se refleja en su totalidad siempre que la dirección de incidencia forme un ángulo lo bastante pequeño con la frontera de separación. Este tipo de reflexión interna total es lo que mantiene las señales confinadas en el interior de una fibra óptica, por ejemplo. Pero incluso cuando toda la luz se refleja hacia el interior, los campos eléctrico y magnético no se anulan por completo en la interfase. Se extienden un poco más allá de la frontera, formando ondas evanescentes que no se propagan más allá de la vecindad inmediata de la interfase y que tampoco transportan energía a través de la superficie. Las ondas evanescentes provocan que el campo electromagnético cercano a la superficie «vibre en el sitio», como las cuerdas de una guitarra.

En una situación como la que acabamos de describir no hay efecto túnel. Sin embargo, si se coloca un tercer medio muy próximo a la interfase lo bastante cerca como para que se solape con las ondas evanescentes, la luz puede penetrar en dicho medio y drenar energía del sistema, con lo que la reflexión interna en la sustancia original se verá debilitada. El segundo medio, que antes actuaba como una barrera infranqueable, ha sido atravesado por efecto túnel. Este fenómeno solo resulta apreciable si la distancia que separa el primer y el tercer medio no es mucho mayor que la longitud de onda de la luz; en torno a medio micrómetro en el caso de la luz visible.

Newton ya había observado el fenómeno en 1675. Se encontraba investigando el patrón de interferencia que hoy denominamos anillos de Newton, para lo cual había colocado una lente convexa sobre una placa de vidrio. Para que apareciesen dichos anillos, la luz debía propagarse directamente desde la lente hacia la placa. Pero Newton observó que, si las separaba una distancia ínfima (es decir, si mediaba entre ambas una delgada capa de aire), parte de la luz que debía experimentar una reflexión interna total «saltaba» a través del hueco.

El efecto túnel resulta muy ajeno a nuestra intuición. En 1928, George Gamow fue el primero que lo empleó en un contexto cuántico para explicar la emisión de partículas alfa por parte de ciertos isótopos radiactivos [*véase* «De una nota desafinada al principio de incertidumbre», por N. Treitz; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. Advirtió que las partículas ra-

diadas no deberían poseer la energía suficiente para abandonar el núcleo; del mismo modo que la bala de un cañón, que carece de la energía suficiente, no puede escapar del campo gravitatorio terrestre. Pero Gamow demostró que, gracias a su naturaleza ondulatoria, las partículas alfa podían atravesar la barrera de energía y abandonar el núcleo.

En contra de la creencia popular, el efecto túnel no es exclusivo de la mecánica cuántica: ocurre también con las ondas clásicas. Así, y en contra de lo que cabría esperar, la luz del sol que se propaga por el exterior de una gota de agua puede penetrar en ella por efecto túnel y contribuir así a la producción de una gloria.

En nuestro análisis de 1987, Wiscombe y yo estudiamos la dispersión por una esfera reflectante perfecta, como una bola bañada en plata. Descubrimos que las ondas parciales asociadas a los rayos que pasaban por encima del borde, muy cerca de la esfera, podían alcanzar la superficie por efecto túnel y contribuir a los procesos de difracción.

En el caso de una esfera transparente, como una gota de agua, la onda puede alcanzar la superficie por efecto túnel y, después, propagarse por el interior. Una vez allí, la onda incide sobre la superficie interna con un ángulo lo suficientemente pequeño como para experimentar varias reflexiones totales, con lo que queda atrapada dentro de la gota. Algo similar ocurre en ocasiones con las ondas de sonido: en la sala de los secretos de la catedral de San Pablo, en Londres, una persona que musita de cara a la pared puede ser oída desde un punto lejano gracias a las múltiples reflexiones que efectúa el sonido en las paredes curvas de la estancia.

La luz que penetra en la gota por efecto túnel puede también salir de la misma manera. Tras varias reflexiones internas, las ondas que poseen determinadas frecuencias se refuerzan a causa de los fenómenos de interferencia constructiva, un efecto conocido como resonancia de Mie. Podemos compararlo con lo que ocurre al impulsar un columpio justo al ritmo que dictan sus oscilaciones, en cuyo caso la silla subirá cada vez más. Por analogía con el fenómeno acústico, estas resonancias se denominan también «modos sala de los secretos». Una pequeña variación en la longitud de onda basta para destruir el efecto, por lo que las resonancias de Mie se hallan muy bien localizadas y producen un gran aumento de la intensidad [*véase* «Detección ultrasensible», por Jordi Martorell; Investigación y ciencia, octubre de 2011].

Por tanto, en la producción de glorias compiten tres efectos: los rayos que golpean la esfera (incluida la retrodispersión geométrica axial de Ray), los que inciden sobre el borde (en los que intervienen las ondas de superficie de Van de Hulst) y las resonancias de Mie debidas al efecto túnel. En 1977, Vijay Khare, entonces en la Universidad de Rochester, y yo evaluamos la contribución de los rayos cercanos al borde, incluido el término de Van de Hulst; las resonancias fueron analizadas en 1994 por Luiz Gallisa Guimarães, de la Universidad Federal de Río de Janeiro y por mí. En 2002, tras estudiar la importancia relativa de estos efectos, demostré que la retrodispersión axial apenas influye en el fenómeno. Las contribuciones principales provienen, de hecho, de las resonancias que experimentan los rayos que penetran en la gota por efecto túnel.

GLORIAS Y CLIMA

Aparte de la satisfacción intelectual de haber comprendido el origen de las glorias, el efecto túnel de la luz cuenta también con aplicaciones prácticas. Los modos de resonancia descritos se han aprovechado en la construcción de láseres con gotas de agua, esferas y discos microscópicos. El efecto túnel se emplea también en las pantallas multitáctiles, donde la yema del dedo desempeña un papel análogo a la lente convexa en el experimento de Newton: el fenómeno permite que la luz pase a través, sea retrodispersada y genere una señal. Las ondas de luz evanescentes cuentan con importantes aplicaciones en la técnica de microscopía de campo cercano, pues permiten apreciar detalles menores que la longitud de onda de la luz empleada. Gracias a ello se ha logrado superar el límite que siempre habían impuesto los efectos de difracción, por debajo del cual los microscopios comunes solo ofrecen imágenes borrosas.

Pero además, entender los fenómenos de dispersión que tienen lugar en las gotas de agua resulta necesario para estimar el papel que desempeñan las nubes en el cambio climático. El agua es una sustancia muy transparente para la luz visible; pero, al igual que el dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, absorbe ciertas bandas en el infrarrojo. Dado que las resonancias de Mie implican largos caminos en los que se suceden múltiples reflexiones internas, una gota puede llegar a absorber una cantidad notable de radiación, sobre todo si el agua se encuentra contaminada. Por tanto, a medida que la nubosidad promedio cambia, ¿reflejarán las nubes más luz y ayudarán a enfriar el planeta, o atraparán radiación infrarroja y contribuirán a calentarlo?

Hasta hace una década, las simulaciones sobre la dispersión de luz en las nubes ejecutaban los cálculos de Mie con solo algunos tamaños de gotas, aquellos que se creían más representativos de las nubes. Si bien así se reducía el tiempo de cálculo, el método adolecía de un inconveniente. Tal y como demostré en 2003, las técnicas de simulación estándar podían cometer hasta un 30 por ciento de error en determinadas bandas del espectro. Dado que el cálculo solo se efectuaba para algunos tamaños característicos, se obviaban numerosas resonancias intermedias que, en ocasiones, podrían contribuir de manera apreciable. Una simulación que considerase gotas de 1, 2, 3, 4... micrómetros, por ejemplo, podría estar pasando por alto una resonancia muy aguda a los 2,4 micrómetros. Esta predicción fue confirmada en 2006 por un estudio que tuvo en cuenta la distribución de tamaños de las gotas atmosféricas. Durante los últimos años, los modelos se han actualizado a fin de incluir gotas con una variedad mucho más rica de tamaños intermedios.

Como había advertido Wigner, incluso los resultados de un superordenador pueden resultar poco fiables si no van acompañados de una comprensión física del fenómeno. Algo sobre lo que reflexionar, tal vez, la próxima vez que tome un asiento junto a la ventanilla.

PARA SABER MÁS

Diffraction effects in semiclassical scattering. H. M. Nussenzveig. Cambridge University Press, 1992.

Light tunneling in clouds. H. M. Nussenzveig en *Applied Optics*, vol. 42, n.º 9, págs. 1588-1593, marzo de 2003.

Solar absorption by Mie resonances in cloud droplets. C. S. Zender y J. Talamantes en *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 98, n.º 1, págs. 122-129, marzo de 2006.

Light tunneling. H. M. Nussenzveig en *Progress in Optics*, vol. 50. Dirigido por Emil Wolf. Elsevier, 2007.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Prisioneros y permutaciones

Cómo incrementar las probabilidades de éxito cuando todo parece en contra

Hace poco más de un año discutíamos un problema de coordinación entre varios prisioneros a quienes se les ofrecía una oportunidad para liberarse [*véase* «Los prisioneros y la bombilla», por G. Uzquiano; Investigación y Ciencia; marzo de 2011]. Hoy trataremos un problema del mismo género, popularizado por Peter Winkler.

En esta ocasión, 100 prisioneros son llevados a una habitación en la que hay un fichero con 100 cajones, cada uno de los cuales contiene el nombre de uno de los reclusos. Uno por uno, los prisioneros pueden acceder al fichero y abrir hasta un máximo de 50 cajones, para luego dejar todo como estaba. Al igual que en el caso anterior, tendrán prohibido comunicarse entre sí una vez que haya empezado el proceso. Para salir libres, cada recluso deberá encontrar su nombre en alguno de los cajones que abra; si eso no ocurre, todos serán ejecutados. El problema consiste en formular una estrategia que les permita incrementar hasta más del 30 por ciento las probabilidades de éxito.

Mientras los prisioneros discuten qué método adoptar, el guarda, que no puede escuchar las deliberaciones, intentará sabotear el plan. Para ello, intercambiará sus nombres una vez que los reclusos hayan acordado su estrategia. Eso sí, el guarda no podrá realizar ningún otro cambio después de que haya entrado el primer prisionero.



A fin de apreciar la dificultad del problema, conviene pensar en lo que ocurriría si cada recluso eligiera 50 cajones al azar. Como la probabilidad de que uno de ellos encuentre su nombre después de abrir 50 cajones es igual a 1/2, la probabilidad de que *todos* ellos lo logren no supera $1/2^{100}$: una cifra con treinta ceros después de la coma decimal. Así las cosas, parece increíble que exista una estrategia que les permita incrementar la probabilidad de éxito hasta un sorprendente 30 por ciento.

El hecho de que haya cien protagonistas contribuye de manera innecesaria a la complejidad del problema. Comencemos, pues, con otra situación que involucra números más manejables, aunque con la misma estructura.

Cómo abrir una caja fuerte

Un equipo de cinco personas debe abrir una caja fuerte cuya clave consta de cinco dígitos, comprendidos entre 0 y 9. Cada persona conoce una de las cifras del código: una de ellas sabe que el primer dígito es el 3; otra, que el segundo es el 7; otro individuo sabe que la tercera cifra es el 6, y los otros dos saben, respectivamente, que el cuarto y el quinto dígito son el 5 y el 2. Cada persona accederá a la caja fuerte en ese orden, pero sin posibilidad de comunicarse con los demás. Sin embargo, los dígitos del teclado se han intercambiado de manera aleatoria y cada miembro del equipo dispone de solo cinco intentos para dar con la cifra correcta. A la sexta pulsación, el sistema de seguridad bloquea el teclado y se pierde toda opción de abrir la caja fuerte.

Si cada persona escogiese una tecla al azar en cada intento, la probabilidad de abrir la caja sería de $1/2^5$: un 3,125 por ciento. Sin embargo, resulta posible multiplicar por algo más de diez la probabilidad de éxito. Para ello, basta con que cada persona ejecute el siguiente plan:

(1) Comenzar por la tecla marcada con el dígito deseado.
(2) Si la cifra que aparece en pantalla es la correcta, confirmar. Si no, borrar y pulsar la tecla marcada con el dígito mostrado. Repetir la operación hasta dar con el número correcto o hasta agotar los intentos.

Veamos un ejemplo. Supongamos que la manipulación del teclado ha dado lugar a la siguiente permutación:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	4	6	7	8	9	0	3	5

Si queremos obtener el 3, por ejemplo, (1) nos dice que empecemos por pulsar la tecla correspondiente, tras lo cual aparecerá el 6. Ahora, según (2), borraremos y probaremos con la tecla marcada con el 6. Tras cuatro intentos fallidos, el último dígito en aparecer en pantalla será el 8. Tras pulsar esa tecla, obtendremos el 3.

El lector puede convencerse con facilidad de que la permutación anterior da lugar a que cada persona encuentre el número correcto tras cinco intentos. Por tanto, la estrategia acordada les permitirá introducir la combinación 37652 y abrir la caja fuerte.

Sin embargo, el mismo procedimiento habría fracasado si la permutación inicial hubiera sido la siguiente:

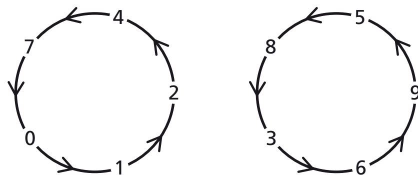
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	6	0	8	9	7	4	5

En ese caso, la primera persona necesitaría nueve intentos para dar con el dígito que desea. Pero, al sexto, el sistema de seguridad bloquearía la caja fuerte y el equipo perdería la oportunidad de abrirla.

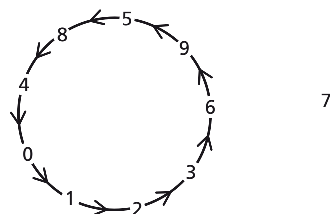
Merece la pena reflexionar sobre la diferencia fundamental entre los dos

Ilustraciones de Daniel Uzquiano

casos. Esta radica en que, mientras que la primera permutación contiene dos ciclos de cinco elementos, la segunda posee uno de nueve. El siguiente gráfico representa la permutación inducida por la primera manipulación del teclado:



La segunda, en cambio, se corresponde con:

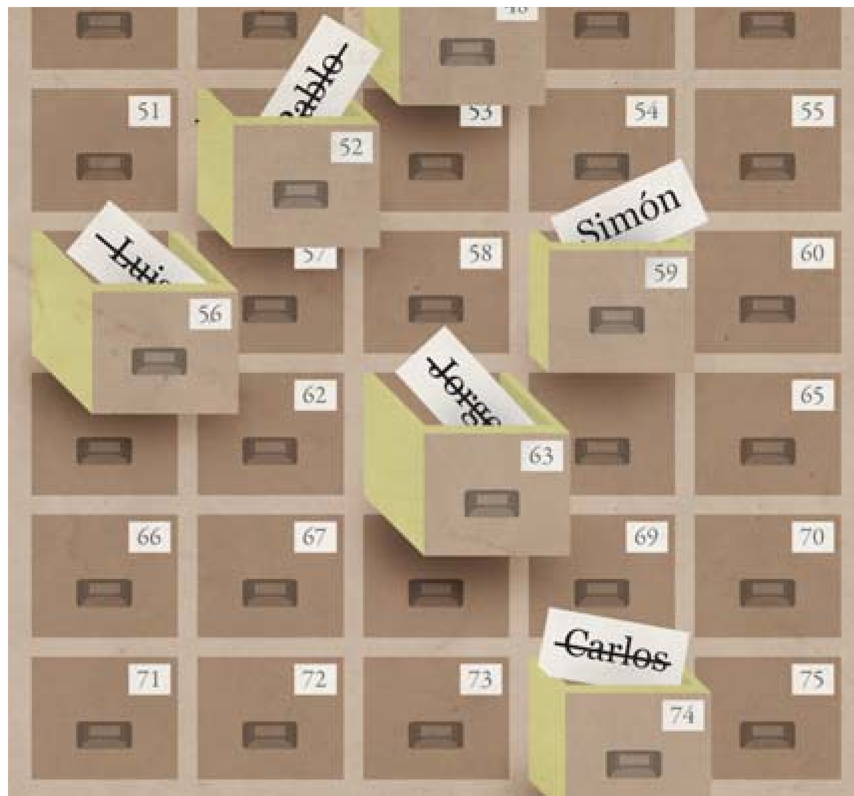


La clave para comprobar el grado de eficacia de la estrategia consiste en notar que esta funcionará siempre que la permutación no posea ningún ciclo de más de cinco dígitos. Por tanto, la probabilidad de éxito vendrá dada por la proporción de permutaciones de diez dígitos que *no* contengan ciclos de más de cinco elementos.

Calculemos el número de permutaciones que incluyen ciclos de *más* de cinco elementos. Como solo disponemos de diez dígitos, ninguna permutación puede contener más de un ciclo de seis o más cifras. Recordemos primero que el número de permutaciones de k elementos viene dado por $k!$, y que el número de maneras de escoger p elementos a partir de un conjunto de N objetos viene dado por $\binom{N}{p} = N!/p!(N-p)!$. Por tanto, si n denota el número de elementos en el ciclo (donde $n \geq 6$), hay $\binom{10}{n}$ maneras de escoger los n elementos que lo componen. Cada una de esas combinaciones puede ser ordenada de hasta $(n-1)!$ maneras (y no $n!$, ya que, al tratarse de un ciclo, no hay ningún «primer» elemento). Por último, los elementos que no forman parte del ciclo pueden ordenarse de $(10-n)!$ formas. Se sigue que, siempre que n sea mayor que 5, hay $\binom{10}{n}(n-1)!\,(10-n)! = 10!/n$ permutaciones diferentes con un ciclo de n dígitos.

Como hay 10! permutaciones de 10 dígitos, la probabilidad de que una de ellas contenga un ciclo de $n \geq 6$ elementos viene dada por $1/n$. Por tanto, la probabilidad de que una permutación contenga algún ciclo de más de cinco elementos es:

$$1/6 + 1/7 + 1/8 + 1/9 + 1/10 \approx 0{,}646.$$



En consecuencia, la probabilidad de abrir la caja fuerte con la estrategia señalada resulta aproximadamente igual a 1 – 0,646: un 35,4 por ciento.

Cómo ayudar a los prisioneros

Una observación parecida ayudaría a los prisioneros del primer problema. El primer paso consiste en que cada uno de ellos se asigne uno de los 100 cajones. Así, la distribución de nombres en el fichero dará lugar a una permutación de los 100 nombres. Como el guarda se ha reservado el derecho a hacer un último intercambio tras las deliberaciones, la mejor opción consiste en que los reclusos se asignen los cajones de manera aleatoria y secreta. Si el guarda supiese qué cajón corresponde a cada prisionero, podría realizar un último intercambio a fin de frustrar la siguiente estrategia:

(1) Cada prisionero comenzará con el cajón que le ha sido asignado.
(2) Si su nombre aparece allí, habrá concluido; si no, abrirá el cajón asociado al prisionero cuyo nombre acaba de encontrar.

Al igual que en el problema anterior, el procedimiento solo fracasará si la ordenación de los nombres en el fichero posee ciclos de más de 50 elementos. Curiosamente, la proporción de permutaciones de 100 elementos que no poseen ciclos de más de 50 resulta muy similar a la anterior. El cálculo es idéntico: el número de permutaciones de 100 elementos que poseen un ciclo de longitud n (cuando $n > 50$) viene dado por:

$$\binom{100}{n}(n-1)!(100-n)! = 100!/n.$$

Como hay 100! permutaciones de 100 elementos, la probabilidad de que una ordenación aleatoria posea un ciclo de n elementos es igual a $1/n$. Por tanto, la probabilidad de éxito de la estrategia indicada vendrá dada por:

$$1 - 1/51 - 1/52 - \cdots - 1/100 \approx 0{,}312.$$

Eugene Curtin y Max Warshauer han demostrado que la solución anterior es, además, óptima: la estrategia adoptada por los prisioneros no solo incrementa la probabilidad de obtener la libertad, sino que la maximiza. Ningún otro procedimiento garantiza una tasa de éxito mayor.

PARA SABER MÁS

El problema de los cien prisioneros es uno de los siete escogidos por Peter Winkler en un breve homenaje a Martin Gardner titulado **Seven puzzles you think you must not have heard correctly**, disponible en su página personal: **www.math.dartmouth.edu/~pw/**

Eugene Curtin y Max Warshauer demostraron que la solución al problema es óptima en **The locker problem,** *The Mathematical Intelligencer*, vol. 28, n.º 1, págs. 28-31, marzo de 2006.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburgo-Essen.

Veladas venusianas a la luz de la Tierra

La órbita y la rotación de Venus guardan una sincronización muy especial con la órbita terrestre

Los terrícolas hemos sido afortunados con nuestro planeta. No solo debido a su distancia al Sol, muy constante todo el año y adecuada para permitir la existencia de vida, sino también en lo que se refiere a la visión del cielo nocturno, única en el sistema solar. Ningún otro planeta ofrece paseos tan románticos a la luz de la luna, pues, de entre todos los satélites, el nuestro es —y por un amplio margen— el mayor en comparación con su planeta.

En lo que respecta a los demás astros, Venus exhibe, sin duda, una gran belleza. Sin embargo, es nuestro planeta el que desde allí brinda un espectáculo esplendoroso cuando se encuentra en oposición al Sol. En ese momento, el Sol, Venus y la Tierra se hallan alineados, la distancia entre ambos planetas es mínima y el Sol ilumina todo el hemisferio terrestre expuesto a Venus. Esta experiencia visual solo es superada por la contemplación de Venus desde Mercurio; no solo porque la luz solar incide con mayor intensidad sobre Venus que sobre la Tierra, sino también porque Venus, debido a su espesa capa de nubes, refleja más del doble de luz que nuestro planeta.

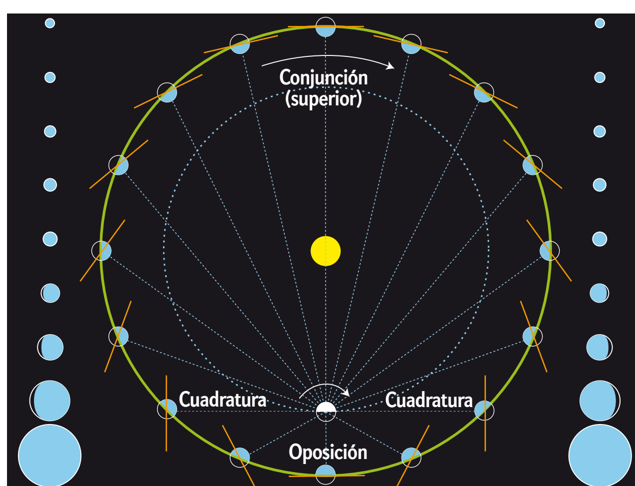
El espectáculo no resulta tan magnífico cuando contemplamos un planeta desde otro que orbita a mayor distancia del Sol, como ocurre al observar Venus desde la Tierra. Cuando ambos planetas se alinean con el Sol y la estrella queda en un extremo, decimos que el planeta más cercano (Venus, en este caso) y el Sol se encuentra en *conjunción inferior*; la Tierra, vista desde Venus, se hallaría en *oposición* al Sol. Si los planetas se alinean con el Sol, pero este se sitúa entre ambos, desde aquí diremos que tiene lugar una *conjunción superior*; desde el punto de vista del planeta vecino, la Tierra se hallaría simplemente en *conjunción* (la única posible desde allí) con el Sol.

Solo durante una conjunción superior resulta posible contemplar la cara diurna de Venus. Pero entonces el planeta se encuentra a una gran distancia de nosotros y, además, su luz palidece en comparación con la del Sol. Durante una conjunción inferior, en cambio, el planeta presenta un mayor tamaño aparente, pero solo vemos su lado nocturno. En realidad, es en las posiciones intermedias cuando Venus se nos muestra más brillante; en esos momentos, su parte iluminada adopta la característica forma de hoz.

Todo cambia cuando observamos un planeta exterior desde otro más cercano al Sol. Entonces puede verse la cara diurna del primero no solo cuando se halla en oposición, sino también durante la conjunción. Además, en cualquier otro momento, las fases del planeta exterior resul-



Desde la Tierra: Representación de un período sinódico de Venus en un sistema heliogeostático. Se indican las conjunciones, las elongaciones (*líneas rojas*) y las fases de Venus (*círculos*), como lucero del alba y como lucero vespertino. El área de los círculos se corresponde con el tamaño aparente del planeta en cada uno de los puntos señalados.

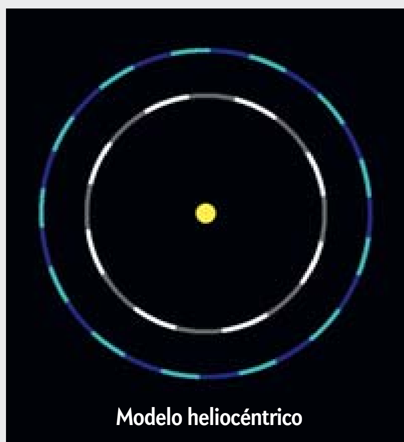


Desde Venus: El mismo período orbital, visto desde el planeta vecino. Se señalan los puntos en los que la Tierra se halla en oposición al Sol, en conjunción con este, las cuadraturas y las fases terrestres. Dado que Venus se encuentra más próximo al Sol que la Tierra, sus fases son mucho mayores, con una «Tierra llena» en la oposición y otra durante la conjunción.

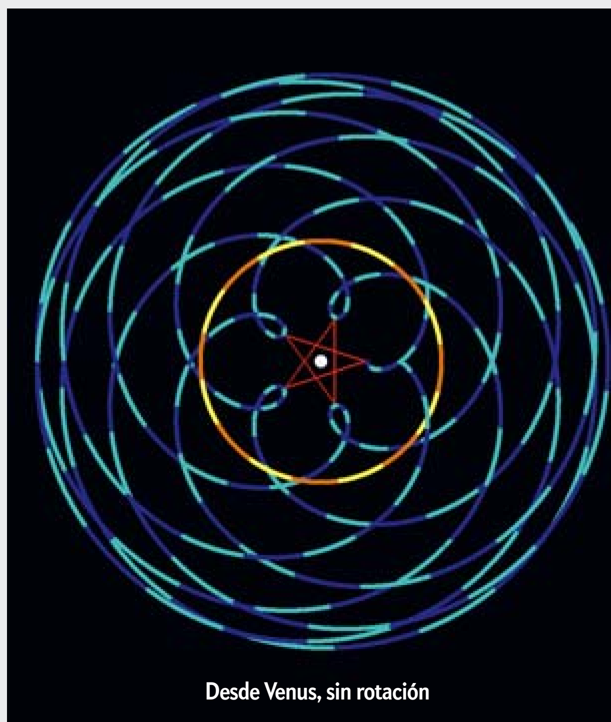
ILUSTRACIONES DE CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ

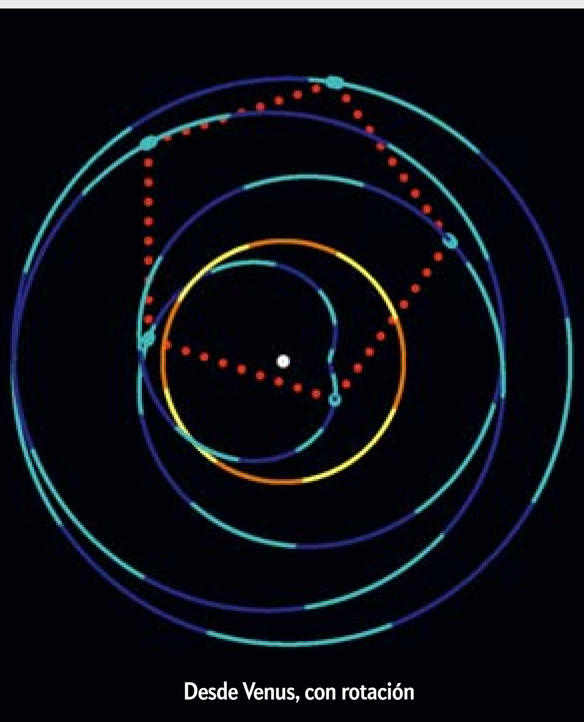
Desde un punto de vista copernicano, las trayectorias resultan sencillas: en torno al Sol (*amarillo*) orbitan Venus (*blanco y gris*) y la Tierra (*azul claro y azul oscuro*). Cada pareja formada por una franja clara y otra oscura «dura», en todas las imágenes, 1/13 años terrestres. Debido a que los períodos orbitales de ambos planetas se encuentran sincronizados, el período terrestre comprende 13 de dichas parejas, y el de Venus, 8.

Un observador en el planeta vecino podría describir los movimientos del Sol y los planetas de un modo similar a como hizo Tycho Brahe (*abajo a la izquierda*): Venus descansa en el centro, el Sol orbita a su alrededor, y la Tierra describe una epitrocoide (no confundir con una epicicloide), cuyos 5 vértices interiores se corresponden con los momentos en los que la Tierra, vista desde Venus, se encuentra en oposición al Sol (o conjunciones inferiores, desde la perspectiva terráquea). Cuando han transcurrido las 5, lo que equivale a 8 años terrestres, la curva se cierra. Los vértices se corresponden con los de un pentágono regular centrado en Venus. Al unirlos con líneas rectas en el orden marcado por la trayectoria de la Tierra, obtenemos una estrella de cinco puntas, que un astrónomo residente en Venus podría llamar *pentagramma terrae*.



La ilustración izquierda solo tiene en cuenta el movimiento de traslación de Venus, pero no su rotación. Este efecto se ha incorporado en la imagen derecha. El plano del horizonte en un punto del ecuador se correspondería con una línea horizontal; el cenit quedaría en el mismo plano de la figura, pero a una distancia infinita hacia arriba. Alrededor del punto que ocuparía el Sol al mediodía (en la línea del cenit, pero a una distancia finita) se ha dibujado un pentágono regular. Sus vértices marcan los lugares por los que pasa la Tierra (*puntos azules*) cuando en el lugar sobre la superficie de Venus considerado es medianoche. La trayectoria de la Tierra se cierra tras un ciclo de conjunción completo; es decir, tras 1,6 años terrestres. La oposición de la Tierra siempre tiene lugar a la misma hora solar; en el meridiano escogido aquí, coincide con la puesta del Sol.

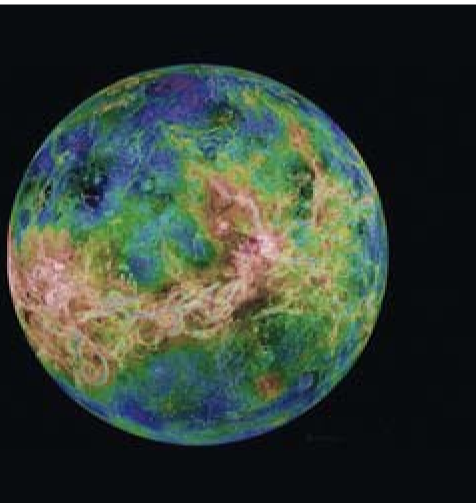




tarán prácticamente indistinguibles, pues del disco completo apenas se ocultará una delgada franja. Incluso cuando el planeta exterior y el Sol subtienden un ángulo relativo de 90 grados (una posición relativa denominada cuadratura), puede verse iluminada más de la mitad del disco.

Las fases planetarias solo dependen del triángulo formado por el Sol y ambos planetas. La orientación de este triángulo con respecto a cualquier sistema de coordenadas resulta del todo irrelevante, motivo por el que resulta imposible distinguir entre el modelo celeste de Copérnico y el de Tycho Brahe a partir de dichas fases [*véase* «¿Quién gira alrededor de quién?», por N. Treitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

Cuando, en el triángulo que conforman la Tierra, Venus y el Sol, el ángulo en el vértice ocupado por Venus toma el valor de 90 grados, desde la Tierra veremos que ambos astros se encuentran separados por la mayor distancia angular posible (en elongación máxima). Esta situación se da tanto si Venus se nos aparece como lucero del alba, antes del amanecer (Phosphoros, para los antiguos griegos), o como lucero vespertino (Hesperos). Dicho ángulo máximo, cuyo seno es igual al cociente entre los radios de las órbitas de Venus y la Tierra, asciende de unos 47 grados. Desde tiempos de Pitágoras,



Mapa topográfico de Venus: Imagen en falsos colores compuesta a partir de los datos tomados por la misión Magallanes, de la NASA, entre 1990 y 1994. La sonda empleó un radar para observar a través de la espesa capa de nubes que recubre el planeta.

sabemos que el lucero del alba y el del ocaso se corresponden, en realidad, con el mismo astro.

Venus tarda 224,701 días en completar una órbita, lo que implica que, con un excelente grado de aproximación, efectúa 1,625 vueltas en torno al Sol por cada año terrestre. La relación entre las velocidades angulares de ambos planetas es, por tanto, de 1,625/1 = 13/8, un cociente «muy racional» entre números enteros pequeños. Esto hace suponer que ambos planetas están a punto de alcanzar cierto equilibrio, una «resonancia» o sincronización estable entre sus órbitas. En otras circunstancias, como cuando un objeto de gran tamaño afecta al movimiento de otro mucho menor, tales proporciones racionales no surgen con facilidad.

Pentagramma veneris

Dado que Venus efectúa 1,625 órbitas por cada año terrestre, cada 1/0,625 años nuestro planeta vecino habrá dado una vuelta en torno al Sol más que la Tierra. Ese tiempo, que asciende a 1,6 años, se corresponde con un ciclo de conjunción completo: la periodicidad con la que el Sol, Venus y la Tierra coinciden, en ese orden, sobre una misma línea recta. Con respecto a las estrellas fijas, sin embargo, esa dirección no es siempre la misma, pues cada vez que se produce una conjunción, nuestro planeta se encuentra 0,6 vueltas «más avanzado» que en la anterior (o, si se prefiere 0,4 vueltas «retrasado»).

Tras 5 ciclos de conjunción, sin embargo, la Tierra habrá completado 8 vueltas exactas en torno al Sol, por 13 de Venus. Por tanto, ambos vuelven a encontrarse alineados y, esta vez sí, en el mismo lugar del cielo con respecto a las estrellas fijas donde lo hicieron 8 años antes. Si marcamos esas 5 alineaciones con los puntos correspondientes sobre una circunferencia, y después los unimos con líneas rectas siguiendo el orden temporal en el que se han sucedido las conjunciones, obtendremos una estrella de cinco puntas: el *pentagramma veneris*. Por muy bello que sea, no se debe sino a una consecuencia aritmética de la resonancia entre las órbitas de Venus y la Tierra en una proporción de 8 a 13.

Pero una sincronización aún más asombrosa se da entre la órbita terrestre y la rotación de Venus sobre su propio eje, la cual ya resulta bastante excepcional debido a su lentitud y, sobre todo, a su carácter retrógrado.

Vistos desde el polo norte celeste, la mayoría de los grandes astros del sistema solar, incluida la Tierra, rotan sobre su eje en sentido contrario a las agujas del reloj. Sus traslaciones orbitales proceden según la misma orientación, motivo por el que esta recibe el nombre de directa o *prógrada*. Por convenio, las velocidades angulares directas se consideran positivas, así como los períodos correspondientes. Las rotaciones u órbitas que transcurren en sentido horario se conocen como *retrógradas* y, a la inversa que las anteriores, a sus velocidades y períodos se les asignan cantidades negativas.

Antes, se suponía que la rotación de Venus estaba sincronizada con su período de traslación (+224 días). Esto significaría que nuestro planeta vecino mostraría al Sol siempre la misma cara, tal y como hace la Luna con la Tierra. De ser así, para los habitantes de Venus el Sol siempre se hallaría en el mismo lugar del cielo: un día eterno para los pobladores del hemisferio iluminado, siempre de noche para el resto. Sin embargo, hoy sabemos que el astro rota sobre su eje con un período retrógrado de –243,0185 días. Ese tiempo se corresponde con –0,6653 años terrestres o, con muy alto grado de aproximación, –2/3 años: otro cociente de números enteros cuyas consecuencias resultan dignas de mención.

¿Cuánto dura un día solar en Venus? Es decir, ¿cuánto tarda el Sol en volver a ocupar una misma altura sobre el horizonte? Para calcularlo, no tenemos más que restar la velocidad angular de rotación del planeta (con signo negativo) y su velocidad angular orbital. Expresando ambas en número de revoluciones por año terrestre, obtenemos que, para un habitante sobre la superficie de Venus, el Sol efectúa –3/2 – 13/8 = –25/8 vueltas por cada año terrestre que pasa; es decir, que tarda –8/25 años (–116,75 días) en volver al mismo lugar sobre el horizonte. Los signos negativos indican que, en Venus, el Sol sale por el oeste y se pone por el este (por supuesto, según la definición que de estos puntos cardinales daría un observador terrestre que contemplase el sistema solar «desde el norte»).

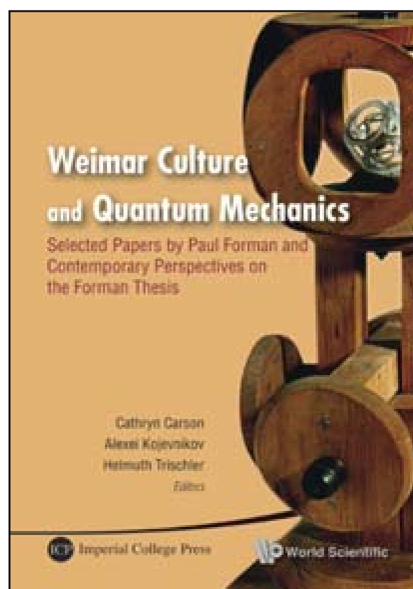
Noches románticas en Venus

Supongamos que un astronauta se encuentra en el ecuador de Venus y que, a pesar de la capa de nubes que cubre el planeta, logra contemplar el cielo. Por un lado, verá cómo cada 8/25 años el Sol sale por el oeste, asciende hasta el cenit y se pone por el este. Pero alrededor de ese Sol gira la Tierra, la cual completa un ciclo de conjunción cada 1,6 años. Durante ese tiempo, Venus efectúa –2,4 rotaciones sobre su eje (el resultado de multiplicar 1,6 años por –3/2 rotaciones por año).

Por otro lado, el *pentagramma veneris* nos dice que, en el mismo intervalo de tiempo, la dirección en la que tiene lugar la conjunción de los planetas y el Sol se desplaza 0,4 vueltas «hacia atrás»; es decir, –0,4 órbitas. Esas cuatro décimas de diferencia en un resultado y otro quieren decir que, desde Venus, todas las oposiciones de la Tierra tienen lugar sobre el mismo meridiano del planeta. Si el astronauta se coloca allí, verá cada 1,6 años una enorme «Tierra llena» en su cenit. Y si se desplaza 90 grados a lo largo del ecuador hacia el este o el oeste, observará cómo la Tierra y el Sol se sitúan uno enfrente del otro, a ambos lados del horizonte, con la Tierra en fase llena y con el mayor tamaño aparente posible. Algo casi tan romántico como contemplar la Luna llena en el horizonte al Sol del ocaso.

Durante los 8 años siguientes se repetirán 5 oposiciones de ese tipo; las estrellas saldrán y se pondrán 12 veces; el Sol, 25, y la Tierra, 20. Todas estas cantidades se deducen a partir de los números 1, 8/13 y –2/3: el período sideral de la Tierra, el de Venus, y el período de rotación venusiano.

NASA/JPL/USGS



WEIMAR CULTURE AND QUANTUM MECHANICS. SELECTED PAPERS BY PAUL FORMAN AND CONTEMPORARY PERSPECTIVE ON THE FORMAN THESIS.

Dirigido por Cathryn Carson, Alexei Kojevnikov y Helmuth Trischler. Imperial College Press-World Scientific. Londres, 2011.

Física de Weimar

Función de los factores culturales y sociales en la aparición de la mecánica cuántica

En 1971, Paul Forman publicó *Weimar culture, causality, and quantum theory, 1918-1927: Adaptation by German physicits and mathematicians to a hostile intellectual environment,* uno de esos trabajos que remueven las aguas tranquilas de una disciplina en progreso. Su impacto sigue condicionando la historia de la ciencia. Ahora se hace criba y recopilación en el libro de cabecera que tiene su origen en la conferencia «The cultural alchemy of the exact sciences: Revisiting the Forman thesis», celebrada en la Universidad de la Columbia Británica en 2007.

La historiografía profesional de la revolución cuántica, que empezó a emerger en los años sesenta, se colocó muy pronto al frente de la innovación metodológica en historia de la ciencia. Hasta entonces el recuerdo de la gestación y desarrollo de la mecánica cuántica fluía del apunte personal de los protagonistas y aproximaciones voluntaristas de divulgadores científicos. Pero irrumpieron físicos pasados al campo de la historia de la ciencia: Thomas Kuhn, John L. Heilbron, Paul Forman o Lini Allen. En 1961 se embarcaron en un ambicioso proyecto, el Sources for History of Quantum Physics (SHQP), un esfuerzo ambicioso que se proponía localizar y catalogar un corpus internacional de manuscritos y correspondencia que cientos de físicos cuánticos empeñaron entre 1900 y 1935. El proyecto Sources duró tres años; los proyectos de seguimiento y adición de fuentes complementarias prosiguen todavía. Para las fuentes americanas trabajó en colaboración con un proyecto similar subvencionado por el Instituto Americano de Física. Kuhn y su equipo contaron con el apoyo económico de la Fundación Nacional para la Ciencia. Al término del proyecto, habían registrado y transcrito unas 175 entrevistas, auténtica *raison d'être* del proyecto con 95 físicos (Niels Bohr, Max Born, Werner Heisenberg, etcétera). Se localizaron unas 50.000 cartas y manuscritos. Buena parte de ellos se catalogaron y microfilmaron. Se depositaron copias en Berkeley, Philadelphia y Copenhague.

En 1967 se publicó un *Inventory and Report* del ahora denominado Archive for the History of Quantum Physics (AHQP). En esa base de datos se identificaron 280 físicos que habían contribuido a la física cuántica y de los que se habían obtenido correspondencia o entrevistas. Ejerció un enorme impacto en la historiografía de la física cuántica, en particular en lo referente a su desarrollo en el período 1919-1927. Historiadores noveles podían sacar a la luz cartas inéditas de Heisenberg, Pauli, Bohr, Born, Schrödinger, Sommerfeld y otros muchos que se esforzaron en desentrañar el átomo, la radiación y sus propiedades cuánticas. En el prefacio al *Inventory and Report*, John A Wheeler, quien logró el apoyo de la Sociedad Americana de Física para el proyecto, adelantaba lo que se ha convertido en tópico: la revolución en física teórica auspiciada por la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica constituía uno de los grandes hitos de la mente humana.

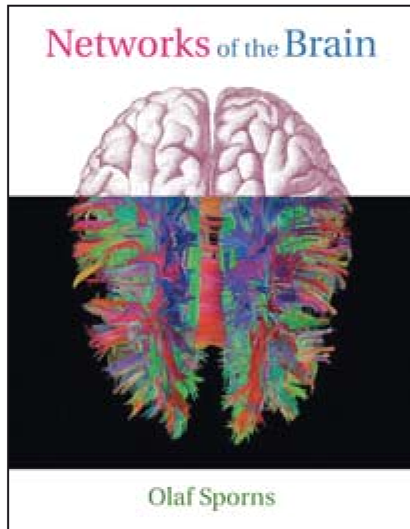
En el otoño de ese año de 1967, Paul Forman presentaba su disertación doctoral *The environment and practice of atomic physics in Weimar Germany: A study in the history of science*, en la Universidad de California en Berkeley. El subtítulo subrayaba que se trataba de una historia, no de una sociología, que era entonces moda. El trabajo analizaba la física alemana desde la óptica de su contexto político y social subsiguiente al fin de la Primera Guerra Mundial. A modo de fundamento empírico, se centró en el clima cultural de un país hundido en lo económico y exacerbado en lo social tras la derrota bélica y el desplome del Imperio Alemán. Una profunda crisis asoló todas las instituciones, ciencia incluida. Numerosos profesionales comenzaron a preguntarse por los fundamentos de su área de conocimiento. Se multiplicaron las declaraciones contra las ideas de racionalidad, progreso, modernidad, que habían prevalecido antes de la guerra. Se extendió una atmósfera intelectual que huía de la realidad y se refugiaba en una suerte de romanticismo intuitivo e irracionalidad. El determinismo mecanicista, el principio de causalidad, se suponía agotado. Físicos y matemáticos prominentes expresaron su disponibilidad a acomodar sus disciplinas al *Zeitgeist*, lo que entrañaba el abandono o restricción de la validez de la causalidad en física. Forman reparó en que esa mentalidad antecedía al año 1925, fecha clave de la invención de la mecánica cuántica. Una vez apareció esta, se celebró su acausalidad intrínseca.

En el diseño original de su disertación, Forman se proponía explorar las vías que llevaron a la innovación en física atómica durante los años veinte. Y hacerlo a través de la biografía de Alfred Landé y otros que intentaron resolver el enigma del estado doblete. Su primer trabajo académico, escrito en 1965 y publicado en 1968, llevaba por título «The doublet riddle and atomic physics *circa* 1924». Revelaba el papel central de la espectroscopia atómica en el fracaso de la vieja teoría cuántica. Una vez los físicos pudieron contar con el espín y la nueva mecánica (1925), desaparecieron del mapa el enigma del doblete y cuestiones afines. Cuando apareció en 1970 «Alfred Landé and the anomalous Zeeman effect, 1919-1921», su vista iba incluso más allá. Las innovaciones de Landé con respecto al efecto Zeeman no seguían la vía directa y lógica registrada por la memoria o incluso los artículos publicados. Antes bien, revelaba un camino tortuoso que solo podía adivinarse a través del estudio de las cartas de ese período. Forman agregó a su artículo transcripciones del epistolario Landé entre febrero y marzo de 1921.

El artículo clásico de Forman mencionado apareció en la revista *Historical Studies in the Physical Sciences*. Traducido a muchos idiomas, se analizó y comentó con profusión una tesis, allí defendida, sobre la conexión entre la actitud del fí-

sico ante la causalidad y su orientación intelectual-política. (En trabajos posteriores abogó incluso por un nexo entre la investigación física y la orientación política.) Su propuesta atrevida ha ejercido enorme influencia en historia de la ciencia, parangonable a la repercusión del análisis, igualmente famoso y controvertido, que en 1931 Boris Essen realizó de la mecánica clásica: *The social and economic roots of Newton's Principia*. Los dos se alejan de la ideología platónica de la ciencia, como una actividad intelectual pura, una búsqueda noble de la verdad abstracta en supuesto control de su método científico estricto y de los criterios del conocimiento verdadero. Antes bien, abordaban la ciencia como una actividad esencialmente humana y, por tanto, también social y cultural. No solo Forman sacudió los cimientos. Frente a la predominante interpretación acausal de Copenhague, la obra de David Bohm y John Bell impulsó un mayor pluralismo filosófico dentro de las diferentes interpretaciones, incluidas las causales.

—Luis Alonso



NETWORKS OF THE BRAIN,

por Olaf Sporns. The MIT Press; Cambridge, Mass., 2011.

Redes cerebrales

Estructurales, funcionales y efectivas

Los conceptos fundamentales de la organización del sistema nervioso se originaron en la segunda mitad del siglo XIX; los estudios anatómicos y fisiológicos establecieron sobre base firme la función celular. De acuerdo con la teoría de la neurona, la célula nerviosa constituía la unidad anatómica, fisiológica, metabólica y genética del sistema nervioso. Enfrente se hallaban quienes rechazaban que las neuronas fueran estructuras definidas y postulaban que las ramas finas de fibras de neuronas tejían una red nerviosa continua, un *reticulum*, que permitía que la actividad neuronal se difundiera libremente por el cerebro. Santiago Ramón y Cajal abanderaba la tesis primera; Camillo Golgi, la segunda. Con el cambio de siglo, se zanjó la cuestión. La doctrina de la neurona se convirtió en el pilar sobre el que se asentaría la neurociencia moderna.

La obra de Cajal, realizada en buena medida con el método de tinción ideado por Golgi, aportó pruebas decisivas de que las neuronas se comunicaban a través de extremos disjuntos, unos hiatos a los que más tarde Charles Sherrington denominaría sinapsis. No obstante la victoria de la doctrina cajaliana, nos hallamos lejos de haber resuelto la forma en que elementos celulares discretos pueden alcanzar una continuidad y una acción de conjunto. Cajal dedujo que las neuronas se hallaban polarizadas y retransmitían señales desde una estructura receptora (la dendrita) a otra transmisora (el axón). Sin embargo, la naturaleza de la señal propagada permanecería envuelta en el misterio hasta adentrado el siglo XX, cuando aparecieron nuevos métodos de detección de la actividad eléctrica del tejido nervioso.

El énfasis puesto en la neurona como unidad anatómica y fisiológica del sistema nervioso no debe confundirse con la idea de que el funcionamiento del cerebro se reduzca a ella. La función cerebral es integradora; requiere que los componentes y los procesos elementales trabajen juntos en patrones complejos. Alcanzado cierto grado de evolución de la maquinaria celular encargada de generar impulsos y de transmitirlos entre células, la conectividad se convirtió en el medio por el que las neuronas generaban patrones de respuesta determinados. La conectividad, al traducir episodios de escala celular en pautas de macroescala, permite integrar las acciones de las neuronas y, por tanto, los procesos cognitivos de percepción, atención y memoria.

Compete a la neuroanatomía identificar las unidades anatómicas (células, grupos celulares y regiones cerebrales) y cartografiar sus interconexiones para revelar la arquitectura cerebral. Las conexiones forman una red estructural, que debe estudiarse con las herramientas y los métodos de la teoría de grafos. Desde hace diez años, el estudio de redes complejas se ha expandido por diversos campos científicos y sociales. De manera creciente, la ciencia se viene ocupando de la estructura, conducta y evolución de sistemas complejos, que abarcan de las células a los ecosistemas. Para comprender tales sistemas, se requiere conocer no solo los componentes del sistema, sino también sus mecanismos de interacción, así como las propiedades emergentes de interacciones.

Los enfoques reticulares comienzan a revelarnos principios fundamentales de la arquitectura y función cerebral. Las redes, que relacionan la estructura del cerebro con el flujo integrado y continuo de dinámica neural, se extienden desde la microescala de las células y sinapsis hasta la macroescala de los sistemas cognitivos y la cognición incorporada. En el sistema nervioso central de los vertebrados, las uniones intercelulares (sinapsis) que se entablan entre neuronas controlan la transmisión de información asociada al aprendizaje, la memoria y la conducta. La creación de esa red constituye un proceso dinámico, en el que participan proteínas de la hendidura sináptica que intervienen en la formación, maduración y remodelación de las conexiones.

¿Qué nos puede decir la ciencia de las redes sobre el cerebro? La disponibilidad de grandes conjuntos de datos y los poderosos ordenadores permiten registrar, analizar y modelar el comportamiento de sistemas compuestos de miles o millones de elementos interactuantes. Todos esos sistemas complejos despliegan diversas pautas organizadas de características, unos patrones que son resultado de un acoplamiento selectivo y altamente estructurado entre elementos, conseguido a través de una red intrincada de conectividad. La conectividad se produce en múltiples formas: interaccio-

nes moleculares, vías metabólicas, conexiones sinápticas, asociaciones semánticas, redes tróficas, redes sociales o pautas de citas.

Los sistemas complejos forman redes de componentes interactuantes. Las interacciones, incluso entre componentes muy sencillos, —pensemos en una molécula de agua—, pueden generar pautas complejas, como los remolinos en el curso de una corriente oceánica o las simetrías espectaculares de los cristales de nieve. Sistemas muy diferentes pueden generar pautas extraordinariamente similares; a modo de ejemplo, los movimientos de partículas en un fluido o los movimientos coordinados de colonias bacterianas, bancos de peces, bandadas de pájaros o masas de trabajadores que vuelven a casa tras la jornada laboral. El cerebro, sistema complejo por excelencia, crea pautas refinadas a través de una red densa de intricada conectividad, correlato neural de la conducta, el pensamiento, la conciencia y la formación de recuerdos.

Todos los planteamientos basados en la teoría de grafos pueden aplicarse a redes que son binarias o ponderadas, directas o indirectas, en el bien entendido de que todos los trayectos representan relaciones diádicas (pares). En las redes cerebrales, el grado y la intensidad del nodo constituyen sendas medidas de interacción directa. Los nodos pueden unirse directamente mediante trayectos sencillos o indirectamente mediante secuencias de nodos y trayectos intermedios. Los nodos reticulares representan los elementos (células, poblaciones celulares o regiones cerebrales), mientras que los trayectos reticulares representan conexiones entre nodos (sinapsis).

Durante buena parte de la protohistoria de la neurociencia, la observación del cerebro significó el examen visual de su anatomía; a saber, las convoluciones de los hemisferios cerebrales, las fibras nerviosas y las regiones de materia gris, así como la estructura fina de las neuronas y sus procesos axonales y dendríticos. Los grandes adelantos en el conocimiento de la naturaleza de la actividad neuronal y la neurotransmisión se lograron, en medida notable, con registros electrofisiológicos de neuronas individuales, realizados en el cerebro intacto de un animal despierto o anestesiado o en un corte tisular. La electroencefalografía (EEG) y magnetoencefalografía (MEG) no son técnicas invasivas, registran directamente señales generadas por la actividad neuronal y presentan, en consecuencia, una alta resolución temporal. Pero la resolución espacial es muy pobre en ambos casos.

Carecemos de técnicas no invasivas para el registro de la actividad neural a una alta resolución espacial y temporal. La tomografía de emisión de positrones (PET) y la resonancia magnética funcional (RMf) miden, respectivamente, las señales metabólicas y hemodinámicas, que se hallan solo indirectamente relacionadas con la actividad neural. Una y otra técnica permiten la reconstrucción de señales localmente circunscritas con una resolución milimétrica a lo largo del volumen cerebral rastreado. En el caso de la RMf, la medición primaria de actividad constituye el contraste entre la susceptibilidad magnética de una hemoglobina oxigenada y desoxigenada en el interior de cada elemento de volumen (voxel), por lo que recibe la denominación de señal «dependiente del nivel de oxígeno en sangre» (BOLD).

La naturaleza de las señales neurales registradas por las técnicas mencionadas difiere significativamente en resolución (espacial y temporal) y en la dirección en que se detecta la actividad nerviosa. El empleo simultáneo de dos o más métodos de registro dentro del mismo experimento puede revelar de qué modo se interrelacionan distintas señales metabólicas o neurales. Diferentes técnicas son sensibles a diferentes niveles de organización. Habida cuenta de la diversidad de métodos para observar el cerebro, no es de extrañar que existan numerosas formas de describir y medir la conectividad cerebral. La conectividad cerebral puede inferirse de cortes histológicos que revelen conexiones anatómicas, de registros eléctricos de neuronas individuales o de neuroimágenes funcionales del cerebro entero.

Quizá la distinción más fundamental sea entre conectividad estructural («diagrama de cableado» entre enlaces físicos) y conectividad funcional («red de interacciones dinámicas»). La conectividad estructural y la funcional son mutuamente interdependientes. Una tercera clase de redes cerebrales define la «conectividad efectiva», que abarca la red de interacciones dirigidas entre elementos neurales. Hay, en efecto, tres tipos de conectividad: estructural de acoplamiento físico, funcional de dependencia estadística en dinámica neural y, por fin, efectiva de influencias causales.

A la descripción de la conectividad estructural del cerebro se la denomina «diagrama de cableado», cuyos planos cartografían los elementos y las conexiones del cerebro, a la manera en que transistores y conmutadores dibujan el chip de un computador. Si se obtuvieran a una resolución alta, los planos capturarían la maquinaria celular entera del cerebro y sus conexiones sinápticas, que abarcan aproximadamente unas 10^{11} células y unas 10^{15} conexiones. Para algunos, ese mapa de ruta nos podría llevar al desciframiento de la inteligencia humana.

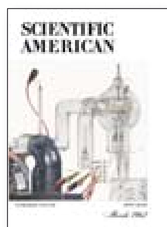
La conectividad funcional nos ofrece las pautas de desviación respecto de la independencia estadística entre unidades neuronales distribuidas y a menudo espacialmente distantes. La base de toda la conectividad funcional son datos de series temporales que se han obtenido de los registros de EEG, MEG, RMf y otras técnicas. Las desviaciones respecto de la independencia estadística reflejan el acoplamiento dinámico. En muchos casos, la conectividad funcional cambia en una escala de cientos de milisegundos; viene modulada por las exigencias externas de la tarea y por la estimulación sensorial, así como por el estado interno del organismo.

Por degeneración se entiende la capacidad de los sistemas de realizar funciones similares, pese a las diferencias que presentan en su configuración y conexión. Un ejemplo de ello lo aportan las redes estructuralmente variables y funcionalmente equivalentes. Se ha observado, en efecto, que diferentes conjuntos de regiones cerebrales pueden prestar soporte a una misma función cognitiva. Los mapas de activación cortical obtenidos a partir de estudios de neuroimagen de distintos individuos muestran a menudo solo un solapamiento parcial para una determinada tarea cognitiva, dando a entender que cada individuo utiliza una red distinta (degenerada). La degeneración nos lleva a la homeostasis, que aseguraría que las variaciones o perturbaciones estructurales no desencadenaran una divergencia descontrolada de resultados funcionales.

La conectividad efectiva, por último, describe la red de efectos causales entre elementos neurales, que puede inferirse a través del análisis de series temporales, modelización estadística o perturbaciones experimentales. Ningún modo de conectividad cerebral, por sí solo, es suficiente para una explicación cabal de cómo operan las redes cerebrales.

—Luis Alonso

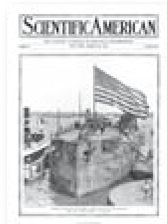
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Marzo 1962

Corrimiento al rojo

«Un reciente artículo de dos astrónomos franceses ha zanjado, al parecer, una cuestión que llevaba más de cuarenta años inquietando a los físicos. Mediante unas medidas de una precisión sin precedentes los astrónomos han descubierto en la luz del Sol un corrimiento gravitatorio hacia el rojo casi igual al predicho por la teoría general de la relatividad. Esa predicción es una consecuencia del principio de la equivalencia de Albert Einstein, según el cual el efecto de un movimiento acelerado resulta indistinguible del de un campo gravitatorio.»



Marzo 1912

Sobre la relatividad

«Algunos opinan que los conceptos de la física moderna bordean, si no invaden, el terreno de la metafísica. Hemos afirmado que la masa de un electrón aumenta con su velocidad; y ese aumento es tal que, a la velocidad de la luz, la masa del electrón se hace infinita. En otras palabras, en la naturaleza resulta imposible el movimiento a una velocidad superior a la de la luz. Antes de que ese principio quedase plenamente establecido [por James Clerk Maxwell y otros], un eminente científico alemán [Arnold Sommerfeld] resolvió la dinámica de los sistemas que se mueven a mayor velocidad que la luz [unas partículas hipotéticas que luego se llamaron taquiones]. He aquí un resultado, una paradoja, de aceptación muy difícil para muchas personas y al que de inmediato las objeciones surgen por sí solas. Ha sido al reflexionar sobre esas objeciones cómo los científicos [Albert Einstein y otros] han acabado formulando el "principio de la relatividad". Ese notable principio constituye la doctrina más esencial de la física moderna. Sostiene que la masa, la longitud y el tiempo son relativos. —John W. N. Sullivan»

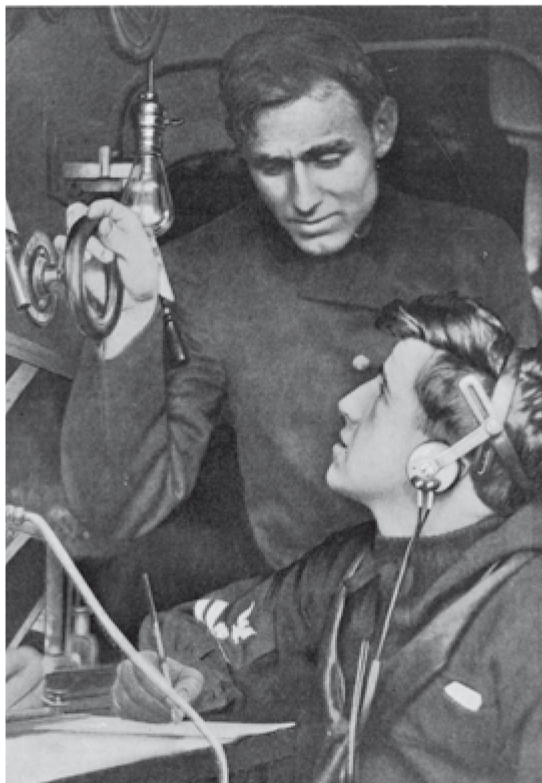
Más ligeros que el aire

«El intento del señor Joseph Brucker de cruzar el Atlántico en dirigible desde las islas de Cabo Verde hasta Barbados destaca por sus métodos de corte empresarial. La aeronave *Suchard* ya ha sido reconstruida tres veces para mantenerla a la altura de los últimos avances y experiencias en la navegación de dirigibles. Desde los inicios, se confió solo en un tipo perfeccionado y bien ensayado, por lo que se construyó un aparato basado en el modelo *Perceval*.»

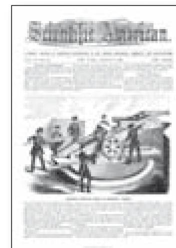
Brucker no consiguió llevar adelante su propósito.

Radiocomunicaciones

«En un plazo de pocos años, casi todos los barcos de la armada, incluidos los carboneros, los remolcadores y las embarcaciones del Servicio Anticontrabando [que luego se llamaría Guarda Costera] han sido equipados con aparatos inalámbricos. Una parte importante de su misión ha consistido en el control de las patrulleras mientras se hallaban de servicio en el mar. Al barco *Gresham* se le atribuye el récord de haber salvado más de tres vidas y remolcado más de cuarenta barcos en situaciones peligrosas tras haber perdido el control.»



En el gabinete de radio del Gresham, a la escucha de llamadas de socorro frente a la peñascosa costa de Nueva Inglaterra, 1912.



Marzo 1862

El primer duelo acorazado

«Mientras el barco blindado *Merrimac* [CSS *Virginia*] sembraba la destrucción entre los anticuados buques de madera de nuestra armada, a la par que provocaba consternación en tierra, en la escena del conflicto se presentó el pequeño *Monitor* con sus dos cañones, y la situación de derrota y desastre no tardó en trocarse en una victoria contundente. Durante varias horas maniobró alrededor del *Merrimac* y, con una precisión perfecta, disparaba sobre cualquier parte del enemigo que eligiese. Mantuvo un cañoneo sin precedentes con absoluta impunidad, y finalmente consiguió expulsar del campo de batalla a su formidable adversario. En el contrato del *Monitor* se había estipulado que el barco sería sometido al fuego enemigo antes de ser aceptado por el Departamento de la Armada, pero no se había previsto que superara una prueba tan rigurosa. Tal demostración sella el destino final de los barcos de guerra de madera.»

Mala caligrafía

«¿No se ha extendido por toda la tierra la maldita pluma de acero hasta hacer casi desaparecer una escritura manual decorosa? Noventa y nueve de cada cien personas usan plumas de acero, y no más de una de esas noventa y nueve tiene la desfachatez de afirmar que puede escribir con ellas. Tenía mucha razón Lord Palmerston: la caligrafía de la presente generación es abominable; y en tanto prosiga perfeccionándose la pluma de acero, la de la siguiente generación será aún peor.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVI, N.º 12; 23 DE MARZO DE 1912

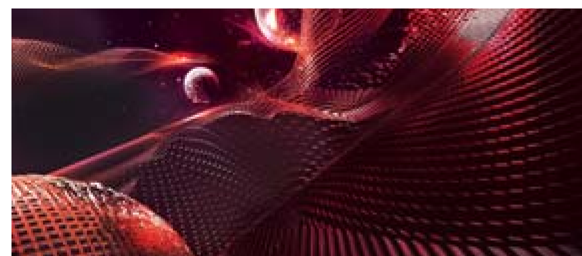
MEDICINA

El debate del cáncer de próstata

Marc B. Garnick

La detección sistemática perjudica más de lo que beneficia porque conlleva la aplicación de tratamientos innecesarios.





FÍSICA

¿Es digital el espacio?

Michael Moyer

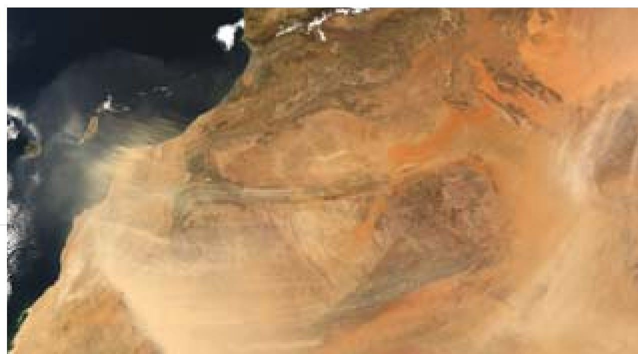
Un experimento intentará medir las conexiones más profundas entre la información, la materia y el espaciotiempo. Si funciona, podría redefinir las reglas de la física del siglo XXI.

BIOLOGÍA COMPUTACIONAL

Evolución viral en la era genómica

Raúl Rabadán

Las técnicas de secuenciación masiva y los modelos matemáticos para el análisis de grandes volúmenes de datos están permitiendo reconstruir la evolución del virus de la gripe, el origen de las pandemias y sus patrones de circulación.



MEDIOAMBIENTE

De África al Amazonas

Jeffrey Bartholet

Las revelaciones del viaje de un puñado de polvo sobre nuestro frágil planeta.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser,
Gary Stix, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Deborah Franklin,
Maryn McKenna, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS
Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER
MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos: 6,00 euros

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Carlos Izpisúa Belmonte: *Cortar y pegar: restauración de la función celular mediante corrección genética*; María A. H. Vozmediano: *Constantes que corren*; Juan Manuel González Mañas: *Un nuevo camino hacia la longevidad*; Yago Ascasibar: *Agujeros negros de masa intermedia*; Carlos Lorenzo: *El barón de los dinosaurios*; Joandomènec Ros: *La brújula interna*; Marián Beltrán: *El urbanismo en la costa de los Esclavos*; Luis Bou: *Más alimentos, menos energía*; Raquel Santamarta: *Un nuevo pilar para la física estadística* y *Curiosidades de la física*; Ana Fernández: *Física de la gloria*; Alfredo Marcos: *Filosofía de la ciencia*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Detección del cáncer*; M.ª José Báguena: *De cerca*; J. Vilardell: *Apuntes* y *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España